

УДК 625.731.82

Т. К. Акчурина^а, Б. А. Бондарев^б, А. Н. Канищев^в, А. Е. Борисов^в, О. В. Душко^а

^а *Волгоградский государственный технический университет*

^б *Липецкий государственный технический университет*

^в *Воронежский государственный технический университет*

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРИЧИН НЕДОСТАТОЧНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Рассматривается проблема низкого уровня вовлечения вторичных материальных ресурсов (ВМР) — золошлаковых материалов, металлургических шлаков, сульфатсодержащих отходов — в дорожное строительство для укрепления грунтов. Целью исследования является системный анализ технологических, нормативных и экономических барьеров, препятствующих масштабному применению ВМР в России, и разработка научно-методической основы для их преодоления. Методология включает сравнительный анализ статистических данных, обобщение отечественного и зарубежного опыта, а также структурно-логическое моделирование. В результате предложена функциональная классификация отходов, структурирована система сдерживающих факторов и разработана концептуальная модель комплексной оценки эффективности применения конкретного вида ВМР, интегрирующая технические, экологические, нормативные и экономические аспекты. На примере золы-уноса тепловых электростанций продемонстрирована работа модели, показавшая, что ключевым ограничением является не техническая пригодность, а нормативно-экономические барьеры. Выводы работы заключаются в необходимости синхронизации мер государственного регулирования, научно-методического обеспечения и рыночных механизмов для создания устойчивой системы использования ВМР в дорожной отрасли в соответствии с принципами циркулярной экономики.

К л ю ч е в ы е с л о в а: вторичные материальные ресурсы, дорожное строительство, укрепление грунтов, циркулярная экономика, золошлаковые материалы, системный анализ, нормативные барьеры, оценка эффективности.

Введение

Актуальность перехода строительной отрасли, в частности дорожного хозяйства, к модели циркулярной экономики обусловлена глобальными вызовами: истощением природных ресурсов, высокой ресурсоемкостью строительства и колоссальными объемами накопления промышленных и коммунальных отходов. В Российской Федерации эта проблема приобретает особую остроту: при ежегодном образовании свыше 7 млрд т отходов уровень их комплексной утилизации не превышает 40 %, что приводит к постоянному росту техногенных масс¹ [1]. Одновременно дорожное строительство, как один из крупнейших потребителей каменных материалов и вяжущих, сталкивается с ростом затрат из-за дефицита местных качественных заполнителей.

Стратегическим ответом на эти вызовы является использование вторичных материальных ресурсов (ВМР) для укрепления местных грунтов при устройстве конструктивных слоев дорожных одежд и земляного полотна дорог низких технических категорий. Данное направление соответствует целям

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

национального проекта «Экология»² и отраслевой программы по применению вторичных ресурсов³. Потенциал ВМР огромен: накопленные объемы золошлаковых материалов (ЗШМ) исчисляются миллиардами тонн, металлургических шлаков и сульфатсодержащих отходов (фосфогипс) — сотнями миллионов тонн [2—4].

Однако, несмотря на доказанную техническую возможность и наличие успешных региональных практик, масштабное внедрение ВМР в дорожное строительство в России не происходит. Существует явный парадокс: между значительным ресурсным потенциалом и мизерным практическим применением лежит комплекс нерешенных системных проблем.

Целью настоящего исследования является системный анализ технологических, нормативных и экономических барьеров, препятствующих масштабному применению ВМР для укрепления грунтов, и разработка научно-методических основ для их комплексной оценки и преодоления.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Провести функциональную классификацию основных видов ВМР по их роли в составах для укрепления грунтов.
2. На основе анализа статистики, нормативной базы и литературных источников выявить и структурировать ключевые группы барьеров внедрения.
3. Разработать концептуальную модель и алгоритм многофакторной оценки целесообразности применения конкретного вида ВМР.
4. Апробировать предложенный алгоритм на примере одного из наиболее массовых видов отходов — золы-уноса тепловых электростанций.

Материалы и методы

Методологическую основу исследования составил системный анализ. В работе использовались следующие материалы и методы:

1. Материалы: официальные статистические данные Росстата (форма № 2-ТП «отходы») за период 2018—2023 гг.; отраслевая программа⁴; научные публикации, монографии и отчеты по теме применения ВМР в дорожном строительстве; данные о химическом составе и свойствах отходов из литературных источников⁵ [1—9].

2. Методы:

- сравнительно-сопоставительный анализ для выявления различий в подходах к утилизации отходов в России и за рубежом;
- классификация по заданным критериям (функциональная роль, химическая активность);
- структуризация (построение блок-схем, систематизация барьеров);
- моделирование (разработка концептуальной модели оценки).

Анализ проводился по схеме: «ресурсный потенциал → техническая пригодность → существующие барьеры → пути их преодоления».

² Национальный проект «Экологическое благополучие». URL: <http://government.ru/govclassifier/919/about>.

³ Применение вторичных ресурсов, вторичного сырья из отходов в сфере строительства и жилищно-коммунального хозяйства на 2022—2030 годы : паспорт отраслевой программы (утв. Правительством Рос. Федерации 10 окт. 2022 г. № 11795п-П11). М., 2022. 48 с.

⁴ Там же.

⁵ Нефтешламы — общее описание проблемы. URL: <http://www.mpold.ru/poleznoe/282-nefteshlamy-obshchee.html>.

Результаты

1. Функциональная классификация ВМР для укрепления грунтов

На основе анализа химико-минералогического состава и механизма действия предложена классификация, определяющая роль отхода в композиционном материале (табл. 1). Данный подход задает вектор для подбора рецептур и определения области применения.

Т а б л и ц а 1

Функциональная классификация вторичных ресурсов для укрепления грунтов

Функциональная роль	Виды отходов	Ключевые свойства и механизм действия
Активные (вяжущие)	Зола-уноса ТЭС (высококальциевая), гранулированный доменный шлак, фосфогипс (активированный)	Пуццолановая/гидравлическая активность; способность к структурообразованию с активатором или самостоятельно
Инертные (заполнители)	Шлаковый щебень, вторичный щебень из бетона, отходы горного производства	Прочность, морозостойкость; создание скелета укрепленного слоя
Модификаторы (добавки)	Нефтешламы, битумные эмульсии, полимерные отходы	Изменение реологических свойств, повышение водостойкости, снижение хрупкости

2. Система барьеров внедрения ВМР

Масштаб проблемы и колоссальный неиспользуемый ресурсный потенциал показывают следующие данные. По состоянию на 2018 г. в Российской Федерации образовалось 7266 млн т отходов, при этом было использовано и обезврежено лишь около 3818 млн т, что сформировало ежегодный разрыв между образованием и утилизацией в 3,45 млрд т [6]. При этом потенциал ключевых ВМР для дорожного строительства остается практически невостребованным: уровень утилизации ЗШМ не превышает 10...20 % при накопленных объемах, оцениваемых в миллиарды тонн, а ежегодный выход только золы-уноса составляет 15...20 млн т [2, 3, 7]. Накопление металлургических шлаков в отдельных регионах достигает свыше 100 млн т (Кузбасс) и около 70 млн т (Урал) [8]. Объемы накопленного фосфогипса превышают 200 млн т [4, 10].

Системный анализ причин данной ситуации выявил три взаимосвязанные группы барьеров, формирующие устойчивую систему, которая блокирует внедрение ВМР на различных уровнях (рис.).



Схема системы барьеров

Детальный анализ каждой группы барьеров, структурированный в табл. 2, позволяет конкретизировать ключевые ограничения.

Т а б л и ц а 2

Детализация барьеров внедрения ВМП в дорожном строительстве

Группа барьеров	Конкретные ограничения
Технологические	<ul style="list-style-type: none">• Неоднородность состава отхода от партии к партии.• Отсутствие гарантий стабильности качества.• Недостаток долгосрочных исследований долговечности конструкций
Нормативные	<ul style="list-style-type: none">• Статус «отхода», создающий административные сложности.• Отсутствие федеральных технических регламентов, приравнивающих ВМП к строительным материалам.• Отсутствие законодательно закреплённой обязательности применения ключевых ГОСТов на ВМП, что оставляет решение об их использовании на усмотрение заказчика и проектировщика.• Межведомственная разобщённость в регулировании обращения с отходами и строительными материалами
Экономические	<ul style="list-style-type: none">• Низкая плата за размещение отходов для их генератора (отсутствие стимулов для переработки).• Высокие транзакционные издержки для потребителя (логистика, испытания, риски).• Отсутствие гарантированных рынков сбыта подготовленных ВМП.• Неконкурентность цены ВМП относительно природного сырья при учёте всех сопутствующих рисков

Указанные барьеры не существуют изолированно, а находятся в отношениях взаимного усиления. Технологические риски и неопределённости требуют разработки сложных норм и процедур согласований, что повышает нормативные барьеры. Нормативная неопределённость, в свою очередь, существенно увеличивает экономические издержки и риски для всех участников процесса. Отсутствие же чётких экономических стимулов делает нецелесообразными инвестиции в совершенствование технологий подготовки и обеспечения стабильного качества ВМП, консервируя технологические проблемы. Таким образом, формируется «замкнутый круг», для разрыва которого необходимы синхронизированные меры по всем трем направлениям.

3. Концептуальная модель комплексной оценки эффективности ВМП

Для преодоления информационной неопределённости предложена четырёхэтапная модель последовательной оценки, включающая: 1) техническую оценку; 2) анализ экологической безопасности; 3) проверку нормативной обеспеченности; 4) расчет экономической эффективности. Детальное содержание каждого этапа и критерии его успешного прохождения представлены в табл. 3.

На любом этапе при отрицательном результате возможны возврат к выбору другого ВМП, доработка материала или отказ от применения.

Т а б л и ц а 3

Содержательное наполнение блоков алгоритма комплексной оценки ВМР

Блок алгоритма	Ключевые оценочные параметры	Критерий положительного прохождения
А. Технический	Химический состав, активность, оптимальная рецептура, прогноз прочности/морозостойкости/водостойкости	Соответствие требованиям СНиП/СП/ГОСТ для конструктивного слоя
Б. Экологический	Токсикологические и радиационные показатели, миграция тяжелых металлов, углеродный след	Соответствие СанПиН/СП и экологическим нормативам
В. Нормативный	Возможность разработки ТУ/СТО, план согласований, изменения в ПСД	Реализуемость в рамках действующего правового поля
Г. Экономический	Затраты на подготовку ВМР, утилизационный эффект, сравнительная стоимость с традиционным решением	Положительный экономический эффект/окупаемость

4. Апробация модели на примере золы-уноса ТЭС

Применение алгоритма к золе-уноса типа II (среднекальциевой) показало следующее:

А. Техническая пригодность. Высокая. Данные лабораторных исследований и практического опыта свидетельствуют, что композиции на основе супесчаного грунта, модифицированные добавкой 10...15 % золы-уноса в сочетании с 3...5 % портландцемента, обеспечивают достижение прочности на сжатие в интервале 3...5 МПа. Данные показатели соответствуют установленным нормативным требованиям к конструктивным слоям оснований автомобильных дорог [1, 5, 6].

Б. Экологическая безопасность и эффект. Риск оценивается как умеренный и управляемый, однако обуславливает необходимость обязательного проведения входного контроля на содержание тяжелых металлов и радионуклидов. Ключевым положительным аспектом является ресурсно-экологический эффект, достигаемый за счет реализации двух принципов циркулярной экономики: утилизации техногенного отхода и частичного замещения высокоуглеродного цемента. Это приводит к комплексному снижению антропогенной нагрузки — сокращению объема захоронения отходов и уменьшению углеродного следа строительного материала.

В. Нормативная обеспеченность. Низкая. Требуется разработка и согласование ТУ на конкретную золу и состав, что является основным сдерживающим фактором для проектировщика.

Г. Экономика. Потенциально высокая эффективность. Потенциал высокий, но его реализация носит условный характер. Проведенные расчеты показывают, что при одновременном выполнении двух условий — учета утилизационного платежа за размещение отходов и логистической близости объекта строительства к источнику образования золы — себестоимость устройства укрепленного слоя может быть снижена на 20...35 % по сравнению с традиционными вариантами на основе привозного щебня или увеличенной доли цемента. Критическим фактором для достижения этой эффективности является формирование стабильных хозяйственных связей и гарантий качества поставляемых ВМР.

Ключевой вывод апробации: техническая возможность не является лимитирующим звеном. Проект останавливается на этапе нормативной неопределенности и неотработанных экономических схем.

Обсуждение

Полученные результаты согласуются с выводами отраслевой программы⁶, где в качестве ключевых проблем также указаны несовершенство нормативной базы и отсутствие экономических стимулов. Однако данное исследование позволяет перейти от констатации к структурированному анализу, выделяя не отдельные препятствия, а их систему.

Предложенная модель оценки является развитием традиционного технико-экономического обоснования, добавляя к нему обязательные экологический и нормативный блоки. Это особенно критично для материалов со статусом отхода, где экологические разрешения и правовые аспекты часто имеют больший вес, чем прочностные характеристики.

Сравнение с зарубежным опытом (ЕС, США) показывает, что прорыв в использовании ВМР достигается только при синхронном выполнении трех условий: 1) четкие «правила игры» (стандарты, статус «продукта»); 2) экономическая заинтересованность генераторов отходов (налоги на захоронение); 3) поддержка со стороны государства (зеленые госзакупки, пилотные проекты)⁷ [11—13]. В России эти элементы разрознены.

На основе модели можно сформулировать конкретные рекомендации:

1. Для государственных органов — ускорение разработки и внедрения федеральных технических регламентов на основные виды ВМР; введение мер стимулирования в рамках госзаказа (коэффициенты, квоты).

2. Для научного и проектного сообщества — создание банка типовых решений и рецептур для различных грунтов и климатических зон; активная разработка и продвижение стандартов организаций (СТО).

3. Для бизнеса (генераторов отходов) — инвестиции в подготовку стабильного по свойствам продукта (усреднение, активация); создание альянсов с дорожно-строительными компаниями.

Заключение

1. На основе системного анализа подтверждено, что низкий уровень использования вторичных ресурсов в дорожном строительстве России обусловлен не отсутствием технологий, а комплексом нормативно-экономических барьеров, образующих устойчивую систему, которая блокирует инициативы на разных уровнях.

2. Разработана и апробирована концептуальная модель комплексной оценки эффективности применения ВМР, которая интегрирует технические, экологические, нормативные и экономические аспекты в единый алгоритм. Модель служит инструментом для снижения рисков и информационной неопределенности при принятии проектных решений.

⁶ Национальный проект «Экологическое благополучие». 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 Рос. Федерации 10 окт. 2022 г. № 11795п-П11). М., 2022. 48 с.

⁷ European Commission. Construction and Demolition Waste: Challenges and Opportunities. 2020. URL: <https://ec.europa.eu>.

3. На примере золы-уноса ТЭС продемонстрировано, что ключевым сдерживающим фактором является нормативная неурегулированность, которая нивелирует потенциальную технико-экономическую эффективность.

4. Для реализации стратегического потенциала ВМР в дорожном строительстве необходима консолидированная политика, синхронизирующая действия законодателей (создание четких правил), науки (методическое обеспечение) и бизнеса (инвестиции в переработку). Преодоление барьеров позволит трансформировать экологическую проблему отходов в ресурсную базу для развития транспортной инфраструктуры в соответствии с принципами циркулярной экономики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *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.
2. *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: MNEMXSX.
3. *Пухов С. А., Киселева С. П.* Вовлечение в хозяйственный оборот золошлаковых отходов тепловых электростанций в интересах эколого-ориентированного развития экономики // *Отходы и ресурсы*. 2020. № 4. URL: <https://resources.today/PDF/10ECOR420.pdf>. DOI: 10.15862/10ECOR420.
4. *Кочетков А. В., Янковский Л. В.* Применение фосфогипса для строительства монолитных слоев дорожной одежды // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. 2017. № 4. С. 91—102.
5. *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.
6. *Слободчикова Н. А., Плюта К. В., Дзозий А. А.* Перспективы использования отходов производства и потребления при строительстве, реконструкции и капитальном ремонте автомобильных дорог // *Вестн. ИрГТУ*. 2015. № 8(103). С. 126—131.
7. Проблемы и перспективы утилизации золошлаковых отходов ТЭЦ. Часть 1 / Г. С. Подгородецкий, В. Б. Горбунов, Е. А. Агапов, Т. В. Ерохов, О. Н. Козлова // *Изв. высш. учеб. заведений. Черная металлургия*. 2018. Т. 61. № 6. С. 439—446.
8. *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.
9. *Балабанов В. Б., Николаенко В. Л.* Применение зольных отходов в дорожном строительстве // *Вестн. ИрГТУ*. 2011. № 6(53). С. 37—41.
10. *Ильин А. П., Кочетков С. П., Брыль С. В., Рухлин Г. В.* Проблемы и перспективы использования вторичных продуктов переработки природных фосфатов для получения строительных материалов // *Экология и строительство*. 2016. № 4. С. 21—29.
11. *Wong K. C., Wang J.* Sustainable urban construction: the role of waste management // *Urban Planning International*. 2019. Vol. 34. Iss. 3. Pp. 37—44.
12. *Soutsos M., Domone P.* Construction Materials: Their Nature and Behaviour. 5th ed. London : CRC Press, 2018. 768 p.
13. *Bustillo Revuelta M.* Construction Materials: Geology, Production and Applications. Cham : Springer, 2021. 347 p.

© Акчурина Т. К., Бондарев Б. А., Канищев А. Н., Борисов А. Е., Душко О. В., 2026

Поступила в редакцию
13.02.2026

Ссылка для цитирования:

Системный анализ причин недостаточного применения вторичных ресурсов в дорожном строительстве / Т. К. Акчурин, Б. А. Бондарев, А. Н. Канищев, А. Е. Борисов, О. В. Душко // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2026. Вып. 1(102). С. 125—133. DOI: 10.35211/18154360_2026_1_125.

Об авторах:

Акчурин Талгат Кадимович — советник РААСН, канд. техн. наук, проф., проф. каф. строительных материалов и специальных технологий, Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ). 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

Душко Олег Викторович — д-р техн. наук, доц., зав. каф. строительной механики, Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; ovd28@mail.ru

**Talgat K. Akchurin^a, Boris A. Bondarev^b, Aleksandr N. Kanishchev^c,
Artem E. Borisov^c, Oleg V. Dushko^a**

^a *Volgograd State Technical University*

^b *Lipetsk State Technical University*

^c *Voronezh State Technical University*

SYSTEMIC ANALYSIS OF THE CAUSES OF INSUFFICIENT USE OF SECONDARY RESOURCES IN ROAD CONSTRUCTION

This article examines the problem of the low level of involvement of large-tonnage secondary material resources (BMR) — ash and slag materials, metallurgical slags, and sulfate-containing waste — in road construction to strengthen soils. The purpose of the research is a systematic analysis of technological, regulatory and economic barriers that hinder the large-scale application of BMR in Russia, and the development of a scientific and methodological framework to overcome them. The methodology includes comparative analysis of statistical data, generalization of domestic and foreign experience, as well as structural and logical modeling. As a result, a functional classification of waste has been proposed, a system of deterrents has been structured, and a conceptual model for the integrated assessment of the effectiveness of a particular type of BMR has been developed, integrating technical, environmental, regulatory, and economic aspects. Using the example of fly ash from thermal power plants, the work of the model is demonstrated, which showed that the key limitation is not technical suitability, but regulatory and economic barriers. The conclusions of the work are the need to synchronize government regulatory measures, scientific and methodological support and market mechanisms to create a sustainable system for the use of BMR in the road industry in accordance with the principles of circular economy.

Key words: secondary material resources, road construction, soil reinforcement, circular economy, ash and slag materials, system analysis, regulatory barriers, efficiency assessment.

For citation:

Akchurin T. K., Bondarev B. A., Kanishchev A. N., Borisov A. E., Dushko O. V. [Systemic analysis of the causes of insufficient use of secondary resources in road construction]. *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. 1, pp. 125—133.
DOI: 10.35211/18154360_2026_1_125.

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

Oleg V. Dushko — Doctor of Engineering Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ovd28@mail.ru; ORCID: 0000-0002-3982-1899