



Возможности применения твердых коммунальных отходов в дорожном строительстве

Н.А. Слободчикова^{1✉}, С.В. Ключев^{2,3}, А.М. Исмаилов⁴

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

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

³Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, Москва, Россия

⁴Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Ежегодно во всем мире образуется огромное количество твердых коммунальных отходов. При этом большая часть этих отходов традиционно вывозится на места захоронения, что выводит из оборота земельные ресурсы, загрязняет почвы, грунтовые воды и атмосферный воздух, оказывает плохое влияние на растительный и животный мир. Повторное использование отходов потребления — важная задача охраны окружающей среды и ресурсосбережения. Одним из перспективных направлений повторного использования твердых коммунальных отходов является строительство автомобильных дорог. Стекланные и пластиковые отходы составляют около 17 % всех образующихся отходов в России. Между тем на основе стекланных и пластиковых отходов возможно получение материалов с высокими физико-механическими характеристиками. В дорожном строительстве стеклобой можно применять в качестве заполнителя для асфальтобетонных смесей, в составе бетонных смесей, для укрепления и стабилизация глинистых грунтов, для производства красок. Пластиковые отходы можно применять в асфальтобетонных и бетонных смесях, для стабилизации грунтов. К основным проблемам, препятствующим их эффективному и широкомасштабному применению относится отсутствие эффективной системы раздельного сбора и сортировки, широкомасштабных исследований применения отходов в разных дорожно-климатических зонах, а также исследований по оценке потенциальной экологической опасности при их применении в конструкциях автомобильных дорог.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы, дорожное строительство, стекланные отходы, пластиковые отходы

Для цитирования: Слободчикова Н.А., Ключев С.В., Исмаилов А.М. Возможности применения твердых коммунальных отходов в дорожном строительстве // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2025. Т. 15. № 1. С. 119–132. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-1-119-132>. EDN: ZKCBEL.

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке в рамках национального проекта «Наука и университет» по созданию новой лаборатории «Разработка, исследования и опытно-промышленная апробация наукоемких технологий и технических средств для производства полимерсодержащих композиционных смесей и изделий из техногенных органоминеральных компонентов» (проект FZWN 2024-0002)

Original article

Application of municipal solid waste in road construction

Nadezhda A. Slobodchikova^{1✉}, Sergey V. Klyuev^{2,3}, Alexey M. Ismailov⁴

¹Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

²Belgorod Shukhov State Technological University, Belgorod, Russia

³Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia

⁴Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

Abstract. Each year, a large amount of solid municipal waste is generated globally. Most of this waste is brought to disposal sites, which takes land resources out of circulation, pollutes soils, groundwater, and atmospheric air, and has a negative impact on flora and fauna. Therefore, recycling of consumer waste becomes one of the most urgent issues of environmental protection and resource conservation. Road construction is a promising area of reuse of solid municipal waste. Glass and plastic waste make up about 17% of all waste generated in Russia. Meanwhile, glass and plastic waste are suitable for the production of materials with high physical and mechanical characteristics. In road construction, glass waste can be used as a filler in asphalt concrete mixtures, as a component of concrete mixtures, as a reinforcement and stabilization material for clay soils, as well as in the production of paints. Plastic waste can be used in asphalt concrete and concrete mixtures, for soil stabilization. Among the key issues preventing their effective and large-scale use are the lack of an effective system of separate collection and sorting, the absence of large-scale studies on the use of waste in different road climatic zones, as well as the need for studies to assess the potential environmental hazards of its use in road construction.

Keywords: municipal solid waste, road construction, glass waste, plastic waste

For citation: Slobodchikova N.A., Klyuev S.V., Ismailov A.M. Application of municipal solid waste in road construction. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2025;15(1):119-132. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-1-119-132>. EDN: ZKCBEL.

Acknowledgements: The work was carried out with financial support within the framework of the national project "Science and University" to create a new laboratory "Development, research and pilot testing of high-tech technologies and technical means for the production of polymer-containing composite mixtures and products from man-made organomineral components" (project FZWN 2024-0002)

ВВЕДЕНИЕ

Твердые коммунальные отходы (ТКО) представляют собой отходы, образующиеся в жилых помещениях в процессе потребления физическими лицами, а также товары, утратившие свои потребительские свойства в процессе их использования физическими лицами в жилых помещениях в целях удовлетворения личных и бытовых нужд. К ТКО также относятся отходы,

образующиеся в процессе деятельности юридических лиц, индивидуальных предпринимателей, подобные по составу отходам, образующимся в жилых помещениях в процессе потребления физическими лицами. По данным Всемирного банка, к 2050 г. количество ежегодного образования отходов вырастет до 3,4 млрд т [1]. Стоит отметить, что наибольшее количество отходов приходится на развитые страны (рис. 1).

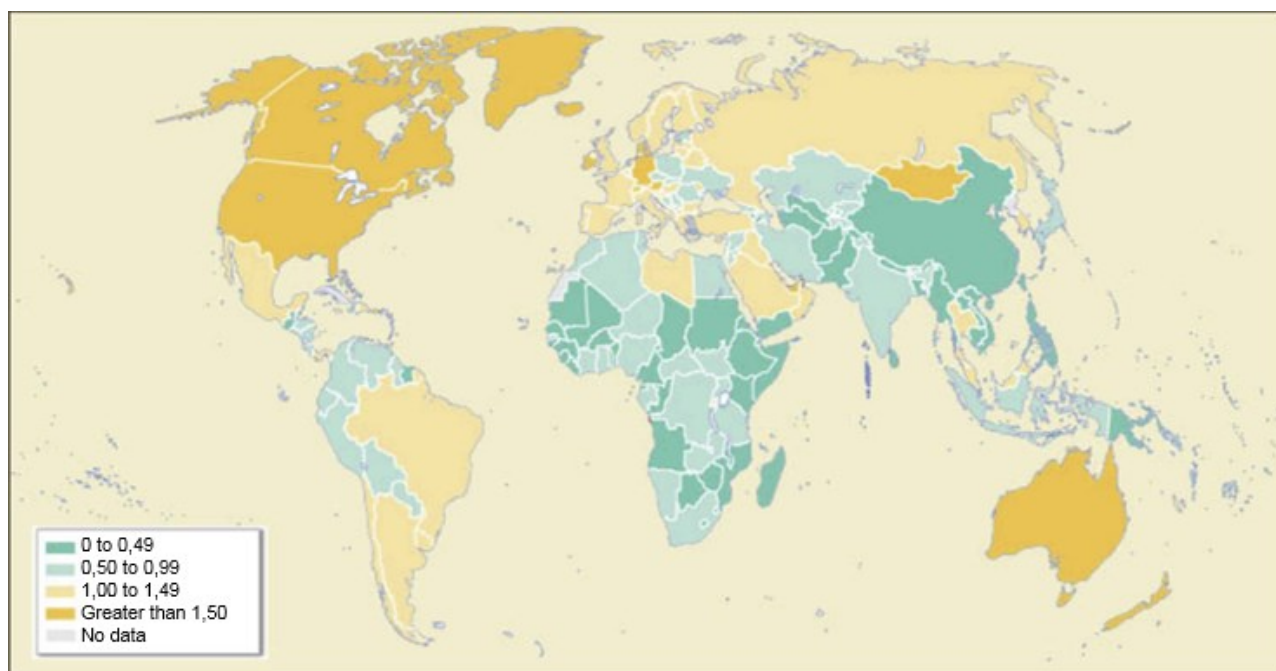


Рис. 1. Образование отходов потребления на душу населения, кг
Fig. 1. Generation of consumption waste per capita, kg

В Российской Федерации по данным Министерства природных ресурсов и экологии в 2023 г. образовано 47 млн т ТКО.

При этом большая часть этих отходов традиционно вывозится на места захоронения (рис. 2).

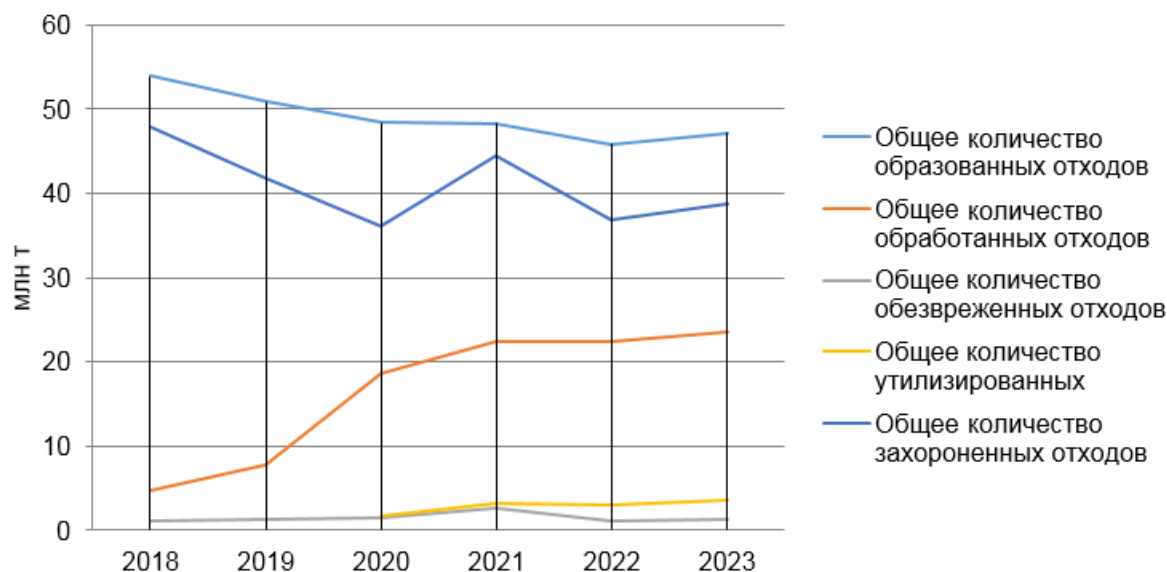


Рис. 2. Образование отходов потребления в России
Fig. 2. Formation of consumer waste in the Russia

Под размещение все возрастающих объемов ТКО ежегодно выделяется 400 000 га земли, что эквивалентно по размеру территории г. Москвы и Санкт-Петербурга. При этом на территории страны имеются места незаконного складирования отходов, площадь которых по разным оценкам варьируется от 10 до 100 тыс. га [2]. Захоронение отходов выводит из оборота земельные ресурсы, загрязняет

почвы, грунтовые воды и атмосферный воздух, оказывает плохое влияние на растительный и животный мир.

Повторное использование ТКО – важная задача охраны окружающей среды и ресурсосбережения.

По данным Российского экологического оператора основную часть ТКО составляют бумага, пищевые отходы и пластик (рис. 3).

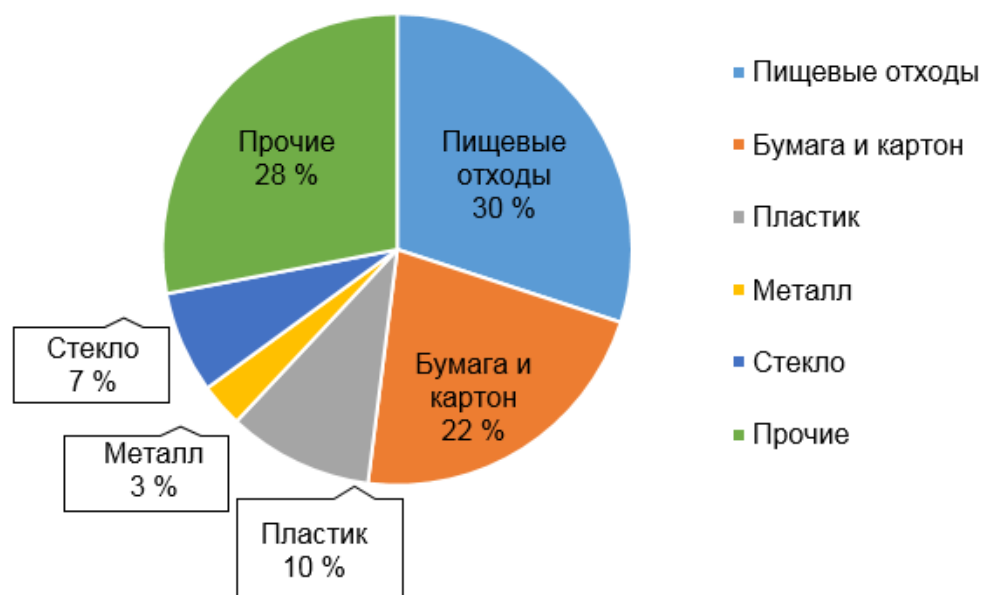


Рис. 3. Состав твердых коммунальных отходов по данным Российского экологического оператора

Fig. 3. Composition of MSW according to the data of the Russian environmental operator

Одним из перспективных направлений повторного использования ТКО является строительство автомобильных дорог.

С точки зрения крупнотоннажной переработки отходов и экономической целесообразности их использование в конструкциях автомобильных дорог представляет наибольший интерес.

МЕТОДЫ

Применение отходов стекла в дорожном строительстве

Исследования по применению отходов стекла в асфальтобетонных смесях проводятся с 1960-х гг. Стоит отметить, что в России действует ГОСТ 34981–2023 «Стеклобой для

вторичного использования. Классификация. Общие положения», согласно которому стеклобой – продукт утилизации отходов производства и потребления силикатного стекла и изделий из него, предназначенный для применения в качестве сырьевого материала при изготовлении продукции. В дорожном строительстве стеклобой можно применять в качестве заполнителя для асфальтобетонных смесей.

Для стеклобоя характерно устойчивость к истиранию, угловатая форма частиц, отражательная способность и водостойкость. Химический состав стеклобоя обусловлен составом исходного стекла и содержанием его в общей массе отходов (табл. 1).

Таблица 1. Химический состав стеклянных отходов

Table 1. Chemical composition of glass waste

Наименование		Отходы стекольного порошка, % [3]	Отходы натрий- кальций- силикатного стекла (ГОСТ EN 572-1–2016)	Отходы боросиликатного стекла (ГОСТ EN 1748–1 –1–2016)	Отходы щелочноземельного силикатного стекла (ГОСТ EN 14178–1– 2016)	Отходы кварцевого стекла (ГОСТ 15130–86)
Диоксид кремния	SiO ₂	69,54	69–74	70–87	55–70	100
Оксид бора	B ₂ O	–	–	7–15	–	–
Оксид кальция	CaO	–	5–14	–	3–12	–
Оксид железа	Fe ₂ O ₃	1,42	–	–	–	–
Оксид алюминия	Al ₂ O ₃	1,81	0–3	0–8	0–15	–
Оксид натрия	Na ₂ O	12,59	10–16	0–8	–	–
Оксид калия	K ₂ O	0,52	–	0–8	5–14	–
Оксид магния	MgO	11,24	0–6	–	–	–
Оксид циркония	ZrO ₂	–	–	–	–	–
Оксиды стронция и бария	SrO BaO	–	–	–	1–15	–
Прочие компоненты		–	0–5	0–8	0–10	–

Замена традиционных заполнителей в асфальтобетонных смесях на стеклянные позволяет повысить устойчивость асфальтобетонного покрытия к износу и к деформациям, шероховатость (коэффициент сцепления колеса транспортных средств с покрытием), стойкость к образованию колеи и яркость покрытия, что

способствует улучшению видимости на дорогах. У применения стеклобоя в асфальтобетонных смесях есть недостатки. Поверхности частиц обычно гладкие, что может приводить к снижению плотности, увеличению воздушных пустот и водопроницаемости асфальтобетонной смеси. Плохая адгезия стекла с битумом

из-за низкой впитывающей способности стекла препятствует формированию прочного каркаса в асфальтобетонных смесях и может приводить к отслаиванию битумной пленки от стеклянных частиц из-за воздействия воды. Это сказывается на долговечности асфальтобетона, приводит к снижению несущей способности, образованию выбоин, расслоению и другим повреждениям, связанным с воздействием воды. Наличие в смесях неабсорбированного вяжущего может привести к расширению асфальтобетонной смеси в жаркую погоду, из-за чего смеси с высоким содержанием отходов стекла могут быть склонны к образованию трещин [7].

Для решения проблемы недостаточной адгезии между стеклянными частицами и битумом в основном используются различные добавки или битум с более высокими связующими свойствами. Это добавки на основе органически-силикатных материалов в нанометрическом масштабе [4, 5]. Также используются гашеная известь или портландцемент [6]. Преимуществом этих материалов является низкая стоимость, но при этом их трудно равномерно распределить в объеме т. к. они обычно добавляются непосредственно в асфальтобетонную смесь. Силаны (SiH_4) с органическими и неорганическими связями используются в качестве вяжущих веществ. Их применение, помимо увеличения адгезии между битумом и стеклом, повышает водостойкость асфальтобетонной смеси. В то же время добавление большого количества (более 10 %) силанов отрицательно сказывается на стабильности асфальтобетонной смеси. На конечные свойства асфальтобетонной смеси и асфальтобетона влияет количество и размер стеклянных частиц. Следовательно, не рекомендуется применение частиц размером более 9,5 мм, т. к. они могут приводить к повреждениям кожных покровов у человека и проколам шин транспортных средств при контакте с асфальтобетоном. Размер должен быть от 0 до 2,36 мм. Замена традиционных заполнителей на частицы мелкие (2,36–4,5 мм) и крупные (4,75–9,5 мм) позволяет повысить устойчивость покрытия к износу, скольжению, проникновению воды и образованию колеи. При увеличении количества стеклянного заполнителя до 20 % и выше устойчивость к колееобразованию снижается примерно на 74 %. Это вызвано хрупкостью самого стекла и слабой адгезией. Разными исследователями рекомендуется количество стеклянного заполнителя в составе асфальтобетонной смеси не более 15 % [6–9].

Применение отходов стекла в составе бетонных смесей

На основе стеклянного порошка возможно получение бетонов с прочностью на сжатие 120–200 МПа [10]. Замена песка в составе бетонных смесей на измельченный стеклянный порошок в количестве до 20% позволяет улучшить удобоукладываемость бетонной смеси, т. к. водопоглощение частиц битого стекла ниже традиционных заполнителей, увеличить прочность бетона на сжатие и растяжение при изгибе и снизить водопоглощение [3, 11, 12]. Стеклянный порошок также можно использовать для замены цемента и в качестве дополнительного вяжущего материала. Он перерабатывается с помощью плавления, вместе с кальцинированной содой и карбонатом кальция при температуре 500–1300 °С с последующим охлаждением для затвердевания без кристаллизации. Присутствие стекла в бетонной смеси приводит к пуццолановым реакциям с портландитом и образованием гидрата силиката кальция (C-S-H), что улучшает микроструктуру бетона и повышает прочность и долговечность [10, 12].

При этом возможны три варианта реакции, которые определяются скоростью растворения диоксида кремния и щелочностью порошкового раствора бетона:

1. Если pH находится между 12 и 13, содержится большое количество Ca^{2+} , то обычно происходит образование C-S-H.

2. Если имеется избыток Ca^{2+} и значительное количество Al^{3+} , то образуется алюминат кальция силикатный гидрат (C-A-S-H). Оба продукта реакции полезны для улучшения структуры пор и повышения прочности. Образование C-S-H на поверхности кремнезема препятствует его дальнейшему растворению, а C-S-H, содержащий $\equiv\text{Si-O}$, поглощает и связывает катионы щелочных металлов (Na^+ и K^+), тем самым подавляя реакцию щелочного кремнезема (ASR).

3. Если pH превышает 13, в порошковом растворе присутствует большое количество Na^+/K^+ , а при наличии портландита вокруг стеклянных частиц образуется щелочной кремнеземный гель и размер частиц превышает 1 мм, то это приводит к вредному ASR. Стеклянные частицы размером менее 425 мкм не вызывают вредного расширения ASR.

Возможна замена зол-уноса на стеклянный порошок в количестве до 15 %, что увеличивает прочность на сжатие. Дальнейшее увеличение содержания стеклянного порошка приводит к снижению прочности на сжатие [13]. Он также обеспечивает более однородные свойства материала и более привлекательный внешний вид бетона благодаря своему белому

цвету по сравнению с золами-уноса [10].

Укрепление и стабилизация глинистых грунтов

Добавление стеклянного порошка (размером частиц менее 5 мм) в количестве 10–15 % от массы сухого грунта в набухающие глинистые грунты позволяет увеличить прочностные характеристики за счет увеличения трения и сцепления между стеклянными и глинистыми частицами [15–14]. При более высоком содержании стеклянных частиц прочностные характеристики снижаются из-за их слипания и увеличения пористости. Также можно снизить набухание/усадку и повысить механическую устойчивость к подъему и усадке за счет увеличенного сцепления между частицами, обусловленного их угловатой формой. Применение стеклянного порошка в количестве до 10 % и цемента в количестве 5 % для укрепления и стабилизации глинистых грунтов позволяет снизить показатель текучести и число пластичности, увеличить максимальную плотность при одновременном снижении оптимальной влажности, т.к. частицы стекла обладают значительно меньшей способностью поглощать воду [16]. Из стеклобоя возможно изготовление стекловолокон. Они изготавливаются из расплавленного стекла, которое выдавливается через мелкие отверстия. Затем их вытягивают и быстро охлаждают для получения нитей. Они характеризуются высокой прочностью при растяжении (650 МПа), жесткостью, устойчивостью к коррозии и высокой термостойкостью

[17]. Совместное применение стекловолокон разной длины (12, 18 и 24 мм) в количестве 0,6–0,8 %, цемента, зол-уноса для укрепления илов позволяет увеличить калифорнийское число CBR, при этом прочность зависит от размера волокон, и уменьшить пористость [18].

Применение отходов стекла для производства красок

Использование в качестве сырья для производства стеклянных гранул или шариков в светоотражающей краске для автомагистралей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Применение отходов пластика в дорожном строительстве

Пластик относится к группе синтетических материалов, изготовленных из углеводородов, полученных в результате полимеризации органического сырья, в основном природного газа и сырой нефти. Благодаря различным типам полимеризации производство пластмасс возможно с определенными свойствами: твердые или мягкие, непрозрачные или прозрачные, гибкие или жесткие. К основным видам пластмасс относятся термопласты, реактопласты и эластомеры. Самыми распространенными пластмассами являются: поливинилхлорид, полиэтиленрефталат, полипропилен, полистирол, полиэтилен низкого давления, полиэтилен высокого давления. В настоящее время база синтетических полимерных материалов доходит до 100 тыс. наименований, основная часть из них представлена в табл. 2 [19].

Таблица 2. Виды пластиковых отходов

Table 2. Types of plastic waste

Пример отходов	Наименование	ГОСТ 33366.1-2015 (ISO 1043-1:2011)	Свойства
Бутылки для напитков, упаковки для порошков и сыпучих пищевых продуктов, полиэстер	Полиэтиленрефталат (лавсан)	PET	Легкий удельный вес 1,33 г/см ³ Температурная стойкость в диапазоне температур от -50 до +85 °С Светопропускная способность свыше 90 % Высокая ударная прочность
Пакеты фасовочные для соков и молока, контейнеры для продуктов, бутылки для шампуней, отбеливателей	Полиэтилен высокой плотности (низкого давления)	PEHD (HDPE)	Плотность 961 кг/м ³ Температура плавления 131,8 °С (269,24 °F) Температура кристаллизации 121,9 °С (251,42 °F) Скрытая теплота плавления 188,6 кДж/кг Теплопроводность 0,54 Вт/м °С. Удельная теплоемкость от 1331 до 2400 Дж/кг-К Удельная теплоемкость (твердое вещество) 2,9 кДж/кг °С

Окончание табл. 2

Пример отходов	Наименование	ГОСТ 33366.1- 2015 (ISO 1043- 1:2011)	Свойства
Окна, двери, мебель, напольные покрытия, банки для пищевых жиров	Поливинилхлорид	PVC	Плотность 1,35–1,43 г/см ³ Температура плавления от 150 до 220 °С Трудногорюч – при температурах выше 110–120 °С склонен к разложению с выделением хлористого водорода HCl. Не растворяется в воде, спиртах, углеводородах (в том числе бензине и керосине) Устойчив к действию кислот, щелочей, растворов солей, жиров, спиртов, обладает хорошими диэлектрическими свойствами. Предел прочности при растяжении – 40–50 МПа, при изгибе – 80–120 МПа Нагревостойкость – +66 °С. Обладает малой морозостойкостью (–15 °С)
Пакеты, пищевая пленка, ведра, трубы, крышки, гибкие пластиковые упаковки	Полиэтилен низкой плотности (высокого давления)	PELD (LDPE)	Плотность 917–930 кг/м ³ Может выдерживать температуру 65 °С (149 °F) в течение длительного времени и 90 °С (194 °F) в течение короткого времени Бывает прозрачным и непрозрачным, довольно гибким и прочным
Посуда для горячих блюд, одноразовые шприцы, мешки для упаковки круп, сахара, контейнеры для замораживания продуктов, бутылочные крышки, бутылки для кетчупов и сиропов, стаканчики для йогурта, детали автомобилей	Полипропилен	PP	Низкая плотность – 900–910 кг/м ³ Высокая прочность Стойкость к низким и высоким температурам в диапазоне от –15 до +5 °С Температура плавления свыше 160–168 °С. Легкость обработки – материал хорошо поддается сварке, распилу, сверлению, прекрасно гнется Стойкость к агрессивным средам
Игрушки, упаковочные подносы для продуктов, одноразовая посуда, подложки, цветочные горшки, чемоданы, баночки для лекарств	Полистирол	PS	Плотность около 1100 кг/м ³ Удельный вес 1,04–1,06 г/см ³ Термическая стойкость в пределах 100 °С Насыпная плотность гранул 550–570 кг/м ³ Линейная усадка в форме около 0,6 % Высокая эластичность при нагревании Стойкость к спиртосодержащим веществам, разбавленным щелочам, кислотам Долговечность Не впитывает воду Может использоваться в условиях пониженных температур, до –40 °С Начинает плавиться при температуре +240 °С При сильном нагревании или горении полистирол выделяет токсичные вещества

Применение в асфальтобетонных смесях

Известно, что добавление термопластичных модификаторов в обычный битум улучшает его вязкоупругие и реологические свойства [20]. Первые экспериментальные работы с использованием модифицированного асфальтобетона с первичными полимерами относятся к 1930 г., а первая дорога с модифицированным асфальтом была построена в 1970 г. Широко исследовано применение таких полимеров как этиленвинилацетат и стирол бутадиен стирол. Впервые отходы пластика были использованы для модификации асфальтобетона в 1990-х гг., когда применялось пластиковое волокно [21]. В последнее время вызывает большой интерес использование переработанных термопластичных полимеров, таких как полиэтилен, полипропилен и полиэтилентерефталат (табл. 3). Правильное добавление пластиковых отходов в битум улучшает качество и срок службы асфальтобетонных покрытий [22]. Существует два основных способа включения их в асфальтобетонные смеси:

1. Влажный. При влажном способе пластиковые отходы смешивают с битумом, а затем с заполнителями. Этот процесс требует сложного оборудования, такого как миксер с высоким усилием сдвига, пластик должен быть хорошо измельчен или перетерт в порошок, чтобы его можно было смешать с битумом при высоких температурах и получить однородное вяжущее с добавлением пластика.

2. Сухой процесс заключается в смешивании пластиковых отходов с заполнителями перед добавлением битума. Частицы пластика могут либо заменить часть заполнителя, либо расплавиться и покрыть его. Сухой процесс является более простым и экономичным [21]. По сравнению с влажным методом недостатком сухого является то, что взаимодействие между полиэтиленом и связующим веществом неизвестно, а также то, что при сухом методе возникают такие проблемы, как неравномерное распределение пластика, недостаточное набухание, плохая адгезия с асфальтом и заполнителем, и то, что смесь легко высыхает [23].

Таблица 3. Обзор влияния пластика на асфальтобетонные смеси [20–24]

Table 3. Overview of the effect of plastic on asphalt mixtures [20–24]

Вид	Влияние на характеристики асфальтобетона / асфальтобетонного покрытия	Количество
Полиэтилентерефталат	Повышает адгезию между вяжущим и заполнителями Обеспечивает большую эластичность смеси Покрывает поверхности заполнителей, заполняя их поры Улучшает сцепление с заполнителем Повышает температуру размягчения битума Повышает гибкость вяжущего, что улучшает способность восстанавливаться после приложенной нагрузки Улучшение характеристик образования колеи Улучшение усталостной прочности	До 20 % от массы вяжущего
Полиэтилен низкой плотности	Улучшает сцепление между компонентами асфальтобетонной смеси Покрывает поверхности заполнителей Повышает температуру размягчения битума Повышает жесткость асфальтобетонной смеси Повышает стойкость заполнителей к истиранию / износу и ударам Улучшает сцепление с заполнителем усиливает образование колеи и ухудшает усталостные характеристики Повышает устойчивость к усталости и колееобразованию	6,5 % от общей массы смеси заполнителей
Поликарбонат	Повышает адгезию между заполнителями и асфальтобетонным вяжущим Повышает гибкость битума, обеспечивая лучшую эластичность при многократных нагрузках Улучшает термическую восприимчивость Способствует формированию каркасной структуры внутри асфальтобетонной смеси	—

Окончание табл. 3

Вид	Влияние на характеристики асфальтобетона / асфальтобетонного покрытия	Количество
Полиэтилен высокой плотности	Укрепление связи между битумом и заполнителями, когезия Покрывает поверхности и заполняет их поры Повышает температуру размягчения битума Повышает жесткость асфальтобетонной смеси Увеличивают вязкость вяжущего Повышает стойкость заполнителей к истиранию/износу и ударам Обеспечивает эластичность асфальтобетонной смеси Повышает термостойкость Улучшение характеристик образования колеи	До 3 %
Полиэтилен	Обеспечивает эластичность асфальтобетонной смеси Повышает адгезию между асфальтобетонным вяжущим и заполнителями Повышает температуру размягчения битума Повышает жесткость асфальтобетонной смеси Увеличивают вязкость вяжущего Улучшенная структура сцепления внутри смеси, когезия	До 3 %
Полипропилен	Повышенная адгезия между связующим и заполнителями Расплавляет и покрывает заполнители Укрепляет механическую связь между заполнителями, когезия, с улучшением характеристик как при колееобразовании, так и при усталостных разрушениях	—
Поливинилхлорид	Улучшенное сцепление частиц заполнителя Улучшает сцепление между компонентами асфальтобетонной смеси Улучшенная структура сцепления внутри смеси, когезия, с улучшением характеристик как при колееобразовании, так и при усталостных разрушениях	—

Применение в бетонах

В бетонах возможно применение полиэтилена в виде порошка или волокон для частичной замены мелкого заполнителя.

Введение полиэтилена в количестве 22 % от массы заполнителя позволяет повысить стойкость к деформациям бетона при затвердении, повысить жесткость и прочностные характеристики.

При содержании полиэтилена в количестве 5 % бетон подходит для строительства покрытий автомобильных дорог [22]. Также возможно применение полиэтилена низкой плотности для изготовления брусчатки.

В исследованиях приведены результаты изучения брусчатки, изготовленной из расплавленных пластиковых отходов, гранита и песка [25–26].

С помощью ортогонального тестирования были определены следующие параметры приготовления: температура смешивания – 200 °С, время смешивания – 210 с., количество уплотнений – 50 раз. Дозировка текучего агента составила 9 %, а оптимальное соотношение цемента и камня – 5,7 % в результате

подбора состава.

Для стабилизации грунтов

Введение измельченных полиэтиленовых пакетов, размером фракций 5×5 мм, в песчаные грунты позволяет увеличить калифорнийское число при содержании отходов 0,06 % от массы сухого грунта, большее процентное содержание полиэтиленовых приводит к снижению угла внутреннего трения и к снижению калифорнийского числа CBR, и снизить водопроницаемость грунта [27].

Применение ТКО в конструкциях автомобильных дорог позволяет повторно использовать большое количество этих отходов.

При этом имеется ряд проблем для широкомасштабного их использования [28–31]:

– в России отсутствует эффективная система раздельного сбора и сортировки отходов потребления;

– отходы даже одного вида могут сильно отличаться по своим химическим и физико-механическим свойствам, наличию и виду примесей

– для приготовления материалов на основе отходов потребления необходимо специальное оборудование.

В литературе пока нет данных об эффективных методах отслеживания потенциальной экологической опасности, связанной с использованием отходов и в частности мелких пластиковых отходов в верхних слоях дорожного покрытия, особенно в отношении вымывания мельчайших фракций пластика в грунтовые воды.

Не существует стандартной процедуры оценки высвобождения микропластика из дорожного покрытия при истирании, следовательно, экологичность использования пластиковых отходов при строительстве дорог еще не доказана, и дорожные службы по-прежнему не решаются продвигать строительство дорог с пластиковым покрытием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В России в 2023 г. образовано 47 млн т ТКО. При этом большая часть этих отходов традиционно вывозится на места захоронения. Захоронение отходов выводит из оборота зе-

мельные ресурсы, загрязняет почвы, грунтовые воды и атмосферный воздух, оказывает плохое влияние на растительный и животный мир. Повторное использование отходов потребления – важная задача охраны окружающей среды и ресурсосбережения. Их можно применять в качестве заполнителя для асфальтобетонных смесей, в составе бетонных смесей, для укрепления и стабилизация глинистых грунтов, для производства красок.

Несмотря на хорошие перспективы применения ТКО в дорожном строительстве, в России существует множество проблем, препятствующих их эффективному и широкомасштабному применению, а именно отсутствие эффективной системы раздельного сбора и сортировки ТКО, широкомасштабных исследований применения этих отходов в разных дорожно-климатических зонах и исследований по оценке потенциальной экологической опасности, связанной с использованием ТКО.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Silpa Kaza, Lisa Yao, Perinaz Bhada-Tata, Frank Van Woerden What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Washington: International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank, 2018. 231 p.
2. Шилкина С.В. Мировые тенденции управления отходами и анализ ситуации в России // Отходы и ресурсы. 2020. Т. 7. № 1. С. 1–17. <https://doi.org/10.15862/05ECOR120>. EDN: ZZGXBE.
3. Bahadur R., Parashar A.K. An Investigation of Waste Glass Powder with The Substitution of Sand On Concrete Mix // Materials Today: Proceedings. 2023. P. 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.123>.
4. Miao Yu, Dongzhao Jin, Yu Liu, Zhanping You, Yalong Li Performance Evaluation of Surface Treatment Waste Glass as Aggregate in Asphalt Mixture // Case Studies in Construction Materials. 2024. Vol. 21. P. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03767>.
5. Chuanqiang Li, Haobo Wang, Chaoliang Fu, Shaosong Shi, Quan Liu, Peixin Xu et al. Effect and Mechanism of Waste Glass Powder Silane Modification On Water Stability of Asphalt Mixture // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 366. P. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130086>.
6. Ming Cheng, Meizhu Chen, Shaopeng Wu, Tianyuan Yang, Jianwei Zhang, Yuechao Zhao Effect of Waste Glass Aggregate On Performance of Asphalt Micro-Surfacing // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 307. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125133>.
7. Anochie-Boateng J., George T. Investigation of The Use of Waste Crushed Glass in The Production of Asphalt Mixes // Construction Materials. 2018. Vol. 171. Iss. 5. P. 187–194. <https://doi.org/10.1680/jcoma.16.00084>.
8. Gedik A. An Exploration into The Utilization of Recycled Waste Glass as A Surrogate Powder to Crushed Stone Dust in Asphalt Pavement Construction // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 300. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123980>.
9. Bochao Zhou, Jiupeng Zhang, Jianzhong Pei, Rui Li, Zhidong Zhang Design and Evaluation of High-Luminescence Porous Asphalt Mixtures Based On Wasted Glass for Sponge City // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 273. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121696>.
10. Bijaya Rai, Kay Wille Recycled Glass Powder as an Alternative to Fly Ash in Non-Proprietary UHPC: A Comparative Study of Resource-Efficient Design, Mechanical and Durability Properties // Journal of Cleaner Production. 2024. Vol. 451. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141907>.
11. Jagriti Gupta, Jethoo A.S., Ramana P.V. Evaluating Long Term Properties of Concrete Using Waste Beverage Glass // Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 61. P. 2. P. 297–306. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.446>.
12. Momeni K., Vatin N.I., Hematibahar M., Gebre T.H. Repair Overlays of Modified Polymer Mortar Containing Glass Powder and Composite Fibers-Reinforced Slag: Mechanical Properties, Energy Absorption, And Adhesion to Substrate Concrete // Frontiers in Built Environment. 2024. Vol. 10. P. 1–10. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1479849>.

13. Marathe S., Mithanthaya I.R., Shenoy R.Y. Durability and Microstructure Studies On Slag-Fly Ash-Glass Powder Based Alkali Activated Pavement Quality Concrete Mixes // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 287. P. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123047>.
14. Perera S.T.A.M., Saberian M., Zhu J., Roychand R., Jie Li Effect of Crushed Glass On the Mechanical and Microstructural Behavior of Highly Expansive Clay Subgrade // *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 17. P. 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01244>.
15. Blayi R.A., Sherwani A.F.H., Hawkar H.I., Rabar H.F., Ako Daraei Strength Improvement of Expansive Soil by Utilizing Waste Glass Powder // *Case Studies in Construction Materials*. 2020. Vol. 13. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00427>.
16. Sheob M., Sajid M., Ansari M.A., Rais I., Sadique M.R., Ahmad S. Using A Blend of Cement and Waste Glass Powder to Improve the Properties of Clayey Soil // *Materials Today: Proceedings*. 2023. P. 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.440>.
17. Rabab'ah S., Al Hattamleh O., Aldeeky H., Abu Alfoul B. Effect of Glass Fiber On the Properties of Expansive Soil and Its Utilization as Subgrade Reinforcement in Pavement Applications // *Case Studies in Construction Materials*. 2021. Vol. 14. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00485>.
18. Gul N., Mir B.A. Performance Evaluation of Silty Soil Reinforced with Glass Fiber and Cement Kiln Dust for Subgrade Applications // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 392. P. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131943>.
19. Потапова Е.В. Проблема утилизации пластиковых отходов // *Известия Байкальского государственного университета*. 2018. Т. 28. № 4. С. 535–544. [https://doi.org/10.17150/2500-2759.2018.28\(4\).535-544](https://doi.org/10.17150/2500-2759.2018.28(4).535-544). EDN: QNGYYX.
20. Kwabena Appiah J., Nana Berko-Boateng V., Ama Tagbor T. Use of Waste Plastic Materials for Road Construction in Ghana // *Case Studies in Construction Materials*. 2017. Vol. 6. P. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2016.11.001>.
21. Cardoso J., Ferreira A., Almeida A., Santos J. Incorporation of Plastic Waste into Road Pavements: A Systematic Literature Review On the Fatigue and Rutting Performances // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 407. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133441>.
22. Birlie Genet M., Bantie Sendekie Z., Lemessa Jembere A. Investigation and Optimization of Waste LDPE Plastic as A Modifier of Asphalt Mix for Highway Asphalt: Case of Ethiopian Roads // *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2021. Vol. 4. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100150>.
23. Xiaobo Du, Shaohui Liu, Hongwei Lin, Xiuchen Xu, Zhixian Zheng, Hongchao Zhang Study On Preparation Technology and Performance of Polyethylene Plastic Concrete for Road // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 401. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132917>.
24. Veropalumbo R., Oreto C., Viscione N., Pirozzi F., Pontoni L., Trancone G. et al. Exploring the Effect on The Environment of Encapsulated Micro- and Nano-Plastics into Asphalt Mastics for Road Pavement // *Environmental Research*. 2023. Vol. 216. P. 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114466>.
25. Sakthipriya N. Plastic Waste Management: A Road Map to Achieve Circular Economy and Recent Innovations in Pyrolysis // *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 809. P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151160>.
26. Enfrin M., Myszk R., Giustozzi F. Paving Roads with Recycled Plastics: Microplastic Pollution or Eco-Friendly Solution? // *Journal of Hazardous Materials*. 2022. Vol. 437. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129334>.
27. Singh Parihar H., Verma M. Low Compressive Potency DS-Dune Sand Utilizing PW-Plastic Waste for The Construction of Roads // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 45. P. 2. P. 3005–3009. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.1001>.
28. Klyuev S.V., Slobodchikova N.A., Saidumov M.S., Abumuslimov A.S., Mezhdidov 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. Vol. 7. Iss. 6. P. 1–12. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-6-3>.
29. Pukharenko Yu.V., Khrenov G.M., Kluev S.V., Khezhev T.A., Eshanzada S.M. Design of Steel Fiber-Reinforced Concrete for Slip Forming // *Construction Materials and Products*. 2024. Vol. 7. Iss. 5. P. 1–9. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-5-2>.
30. Ключев А.В., Кашапов Н.Ф., Ключев С.В., Лесовик Р.В., Агеева М.С., Фомина Е.В. и др. Разработка щелочеактивированных вяжущих на основе техногенных волокнистых материалов // *Строительные материалы и исследования*. 2023. Т. 6. № 1. С. 60–73. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-1-60-73>. EDN: GEOBD.
31. Ключев А.В., Кашапов Н.Ф., Ключев С.В., Золотарева С.В., Щекина Н.А., Шорстова Е.С. и др. Экспериментальные исследования процессов структурообразования композиционных смесей с техногенным механоактивированным кремнеземистым компонентом // *Строительные материалы и изделия*. 2023. Т. 6. № 2. С. 5–18. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-2-5-18>. EDN: TIKJQR.

REFERENCES

1. Kaza S., Yao L., Bhada-Tata P., Van Woerden F. *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington: International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank, 2018. 231 p.
2. Shilkina S.V. Global Trends in Waste Management and Analysis of the Situation in Russia. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2020;7(1):1-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.15862/05ECOR120.EDN: ZZGXBE>.
3. Bahadur R., Parashar A.K. An Investigation of Waste Glass Powder with The Substitution of Sand On Concrete Mix. *Materials Today: Proceedings*. 2023;1-5. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.123>.
4. Miao Yu, Dongzhao Jin, Yu Liu, Zhanping You, Yalong Li Performance Evaluation of Surface Treatment Waste Glass as Aggregate in Asphalt Mixture. *Case Studies in Construction Materials*. 2024;21:1-16. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03767>.
5. Chuanqiang Li, Haobo Wang, Chaoliang Fu, Shaosong Shi, Quan Liu, Peixin Xu et al. Effect and Mechanism of Waste Glass Powder Silane Modification On Water Stability of Asphalt Mixture. *Construction and Building Materials*. 2023;366:1-10. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130086>.
6. Ming Cheng, Meizhu Chen, Shaopeng Wu, Tianyuan Yang, Jianwei Zhang, Yuechao Zhao Effect of Waste Glass Aggregate On Performance of Asphalt Micro-Surfacing. *Construction and Building Materials*. 2021;307:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125133>.
7. Anochie-Boateng J., George T. Investigation of The Use of Waste Crushed Glass in The Production of Asphalt Mixes. *Construction Materials*. 2018;171(5):187-194. <https://doi.org/10.1680/jcoma.16.00084>.
8. Gedik A. An Exploration into The Utilization of Recycled Waste Glass as A Surrogate Powder to Crushed Stone Dust in Asphalt Pavement Construction. *Construction and Building Materials*. 2021;300:1-13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123980>.
9. Bochao Zhou, Jiupeng Zhang, Jianzhong Pei, Rui Li, Zhidong Zhang Design and Evaluation of High-Luminance Porous Asphalt Mixtures Based On Wasted Glass for Sponge City. *Construction and Building Materials*. 2021;273:1-9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121696>.
10. Bijaya Rai, Kay Wille Recycled Glass Powder as an Alternative to Fly Ash in Non-Proprietary UHPC: A Comparative Study of Resource-Efficient Design, Mechanical and Durability Properties. *Journal of Cleaner Production*. 2024;451:1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141907>.
11. Jagriti Gupta, Jethoo A.S., Ramana P.V. Evaluating Long Term Properties of Concrete Using Waste Beverage Glass. *Materials Today: Proceedings*. 2022;61(2):297-306. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.446>.
12. Momeni K., Vatin N.I., Hematibahar M., Gebre T.H. Repair Overlays of Modified Polymer Mortar Containing Glass Powder and Composite Fibers-Reinforced Slag: Mechanical Properties, Energy Absorption, And Adhesion to Substrate Concrete. *Frontiers in Built Environment*. 2024;10:1-10. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1479849>.
13. Marathe S., Mithanthaya I.R., Shenoy R.Y. Durability and Microstructure Studies On Slag-Fly Ash-Glass Powder Based Alkali Activated Pavement Quality Concrete Mixes. *Construction and Building Materials*. 2021;287:1-18. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123047>.
14. Perera S.T.A.M., Saberian M., Zhu J., Roychand R., Jie Li Effect of Crushed Glass On the Mechanical and Microstructural Behavior of Highly Expansive Clay Subgrade. *Case Studies in Construction Materials*. 2022;17:1-19. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01244>.
15. Blayi R.A., Sherwani A.F.H., Hawkar H.I., Rabar H.F., Ako Daraei Strength Improvement of Expansive Soil by Utilizing Waste Glass Powder. *Case Studies in Construction Materials*. 2020;13:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00427>.
16. Sheob M., Sajid M., Ansari M.A., Rais I., Sadique M.R., Ahmad S. Using A Blend of Cement and Waste Glass Powder to Improve the Properties of Clayey Soil. *Materials Today: Proceedings*. 2023;1-5. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.440>.
17. Rabab'ah S., Al Hattamleh O., Aldeeky H., Abu Alfoul B. Effect of Glass Fiber On the Properties of Expansive Soil and Its Utilization as Subgrade Reinforcement in Pavement Applications. *Case Studies in Construction Materials*. 2021;14:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00485>.
18. Gul N., Mir B.A. Performance Evaluation of Silty Soil Reinforced with Glass Fiber and Cement Kiln Dust for Subgrade Applications. *Construction and Building Materials*. 2023;392:1-15. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131943>.
19. Potapova E.V. The Issue of Plastic Waste Utilization. *Bulletin of Baikal State University*. 2018;28(4):535-544. (In Russ.). [https://doi.org/10.17150/2500-2759.2018.28\(4\).535-544](https://doi.org/10.17150/2500-2759.2018.28(4).535-544). EDN: QNGYYX.
20. Kwabena Appiah J., Nana Berko-Boateng V., Ama Tagbor T. Use of Waste Plastic Materials for Road Construction in Ghana. *Case Studies in Construction Materials*. 2017;6:1-7. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2016.11.001>.

21. Cardoso J., Ferreira A., Almeida A., Santos J. Incorporation of Plastic Waste into Road Pavements: A Systematic Literature Review On the Fatigue and Rutting Performances. *Construction and Building Materials*. 2023;407:1-13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133441>.
22. Birie Genet M., Bantie Sendekie Z., Lemessa Jembere A. Investigation and Optimization of Waste LDPE Plastic as A Modifier of Asphalt Mix for Highway Asphalt: Case of Ethiopian Roads. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2021;4:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100150>.
23. Xiaobo Du, Shaohui Liu, Hongwei Lin, Xiuchen Xu, Zhixian Zheng, Hongchao Zhang Study On Preparation Technology and Performance of Polyethylene Plastic Concrete for Road. *Construction and Building Materials*. 2023;401:1-13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132917>.
24. Veropalumbo R., Oreto C., Viscione N., Pirozzi F., Pontoni L., Trancone G. et al. Exploring the Effect on The Environment of Encapsulated Micro- and Nano-Plastics into Asphalt Mastics for Road Pavement. *Environmental Research*. 2023;216(1):1-9. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114466>.
25. Sakthipriya N. Plastic Waste Management: A Road Map to Achieve Circular Economy and Recent Innovations in Pyrolysis. *Science of The Total Environment*. 2022;809:1-14. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151160>.
26. Enfrin M., Myszk R., Giustozzi F. Paving Roads with Recycled Plastics: Microplastic Pollution or Eco-Friendly Solution? *Journal of Hazardous Materials*. 2022;437:1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129334>.
27. Singh Parihar H., Verma M. Low Compressive Potency DS-Dune Sand Utilizing PW-Plastic Waste for The Construction of Roads. *Materials Today: Proceedings*. 2021;45(2):3005-3009. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.1001>.
28. Klyuev S.V., Slobodchikova N.A., Saidumov M.S., Abumuslimov A.S., Mezhdidov 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):1-12. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-6-3>.
29. Pukharensko Yu.V., Khrenov G.M., Klyuev S.V., Khezhev T.A., Eshanzada S.M. Design of Steel Fiber-Reinforced Concrete for Slip Forming. *Construction Materials and Products*. 2024;7(5):1-9. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-5-2>.
30. Klyuev A.V., Kashapov N.F., Klyuev S.V., Lesovik R.V., Ageeva M.S., Fomina E.V. et al. Development of Alkali-Activated Binders Based On Technogenic Fibrous Materials. *Construction Materials and Products*. 2023;6(1):60-73. (In Russ.). <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-1-60-73>. EDN: GEOOBD.
31. Klyuev A.V., Kashapov N.F., Klyuev S.V., Zolotareva S.V., Shchekina N.A., Shorstova E.S. Experimental Studies of the Processes of Structure Formation Of composite Mixtures with Technogenic Mechanoactivated Silica Component. *Construction Materials and Products*. 2023;6(2):5-18. (In Russ.). <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-2-5-18>. EDN: TIKJRK.

Информация об авторах

Слободчикова Надежда Анатольевна,
к.т.н., доцент,
доцент кафедры автомобильных дорог,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
✉e-mail: NSlobodchikova@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7845-2969>
Author ID: 518380

Клюев Сергей Викторович,
д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник
НИЛ «Ресурсо-энергосберегающих технологий,
оборудования и комплексов»,
Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г. Шухова,
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, Россия,
профессор кафедры технологий строительства
и конструкционных материалов,
Российский университет дружбы народов
им. Патриса Лумумбы,
117198, г. Москва,
ул. Миклухо-Маклая, 6, Россия,
e-mail: klyuyev@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1995-6139>
Author ID: 529053

Information about the authors

Nadezhda A. Slobodchikova,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Automobile Roads,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
✉e-mail: NSlobodchikova@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7845-2969>
Author ID: 518380

Sergey V. Klyuev,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Leading Researcher NIL "Resource-Saving
Technologies, Equipment and Complexes",
Belgorod Shukhov State Technological University,
46 Kostyukova St., Belgorod 308012,
Russia,
Professor of the Department of Construction
Technologies and Structural Materials,
Peoples' Friendship University of Russia
named after Patrice Lumumba,
6 Miklukho-Maklaya St., Moscow 117198,
Russia,
e-mail: klyuyev@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1995-6139>
Author ID: 529053

Исмаилов Алексей Марленович,

к.т.н., доцент Высшей школы
промышленно-гражданского и дорожного
строительства,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого,
195251 г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая,
д. 29 литера Б, Россия,
e-mail: ismailov-aleksei@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9325-2335>
Author ID: 877001

Alexey M. Ismailov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Higher School of Industrial, Civil and Road
Construction,
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic
University, Russia,
29B Politechnicheskaya St.,
Saint Petersburg 195251, Russia,
e-mail: ismailov-aleksei@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9325-2335>
Author ID: 877001

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests
regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved
by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 17.01.2025.
Одобрена после рецензирования 27.01.2025.
Принята к публикации 28.01.2025.

Information about the article

The article was submitted 17.01.2025.
Approved after reviewing 27.01.2025.
Accepted for publication 28.01.2025.