

УДК 625.7

## Применение техногенных отходов при укреплении грунтов автомобильных дорог

С. В. Клюев<sup>1,2</sup>, Н. А. Слободчикова<sup>3</sup>, К. В. Плюта<sup>3</sup>, А. В. Клюев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, Россия, Белгород, ул. Костюкова, 46

<sup>2</sup> Российский университет дружбы народов, 117198, Россия, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

<sup>3</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 83

**Для цитирования:** Клюев С. В., Слободчикова Н. А., Плюта К. В., Клюев А. В. Применение техногенных отходов при укреплении грунтов автомобильных дорог // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 775–786. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-775-786

### Аннотация

**Цель:** анализ возможности использования техногенных отходов для укрепления и стабилизации грунтов дорожных одежд и земляного полотна автомобильных дорог. **Результаты:** в статье отражены объемы накопления техногенных отходов и рассмотрены способы применения различных их видов для укрепления грунтов слоев автомобильных дорог. Наиболее исследованы золошлаковые отходы ТЭЦ. Также представляют интерес сельскохозяйственные отходы, такие как зола кофейной шелухи, зола багассы, целлюлоза. При этом имеющиеся исследования выполнены в достаточно узких областях. Недостаточно изучено влияние на долговечность укрепленных грунтов таких факторов, как увлажнение, высыхание, замерзание, оттаивание, динамическая нагрузка от транспортных средств, накопление пластических деформаций и т. д. Мало исследований в области оценки влияния материалов на окружающую среду. Во многих работах отмечается, что некоторые виды отходов, такие как зола рисовой шелухи, доменный шлак и зола-унос, нуждаются в дополнительных исследованиях с точки зрения повышения прочности. **Практическая значимость:** данный обзор может помочь в создании методов укрепления и стабилизации грунтов, которые были бы эффективными и долговечными при минимизации воздействия техногенных отходов на окружающую среду. Применение техногенных отходов в составах грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, позволяет снизить стоимость строительства и утилизировать отходы. Необходимы дополнительные исследования, чтобы расширить область применения техногенных отходов в дорожном строительстве в зависимости от вида грунта, конструктивного слоя автомобильной дороги и климатических условий района строительства.

**Ключевые слова:** укрепление грунтов, стабилизация грунтов, техногенные отходы, составы укрепленных грунтов

### Введение

В Российской Федерации финансирование сети автомобильных дорог регионального и местного значения ограничено. В этих условиях особенно важным является применение экономичных технологий строительства авто-

мобильных дорог. К таким технологиям относится укрепление местных грунтов неорганическими вяжущими материалами.

Укрепленные грунты применялись уже более 2000 лет назад при постройке пирамид

Шансы и для укрепления дорог в Древнем Риме. В Европе и России разработка способов и методов укрепления грунтов началась в конце XIX века, после изобретения цемента. В СССР было построено около 60 000 км автомобильных дорог с применением укрепленных грунтов, при этом научные основы были заложены М. М. Филатовым и В. М. Безруком. Ученые сформулировали положение, согласно которому при разработке любых методов укрепления грунтов необходимо всесторонне учитывать свойства тонкодисперсной части грунта, емкость обмена и состав поглощающего комплекса, а также генетические признаки грунта [1, 2].

В российской практике дорожного строительства, согласно ГОСТ Р 70452-2022 «Дороги автомобильные общего пользования. Грунты стабилизированные и укрепленные неорганическими вяжущими. Общие технические условия», используются две технологии:

- укрепление грунтов — введение добавок неорганических вяжущих с целью повышения их прочности, морозостойкости, водостойкости;

- стабилизация грунтов — введение добавок неорганических вяжущих с целью улучшения их водно-физических свойств.

Методы укрепления грунтов неорганическими вяжущими материалами позволяют эффективно использовать техногенные отходы, что, в свою очередь, сокращает потребление природных ресурсов и позволяет улучшить экологическую ситуацию.

Ежегодно в мире образуется огромное количество техногенных отходов. Согласно официальному сайту Евростата [3], в результате всех видов экономической деятельности в странах Евросоюза в 2020 году образовалось 2135 млн т отходов. Наибольший объем приходится на строительство и добычу полезных ископаемых (рис. 1).



**Рис. 1.** Образование отходов в странах Евросоюза по видам экономической деятельности, по данным за 2020 год [3]

В Российской Федерации образование отходов значительно выше (рис. 2): 95% всех образующихся отходов приходится на добычу полезных ископаемых.

Всесторонний обзор опубликованной литературы показывает, что существует значительное количество исследований использования традиционных и нетрадиционных вяжущих для стабилизации и укрепления грунтов автомобильных дорог.

Обзор [4] обобщает существующие знания об укреплении грунта с помощью вяжущих, полученных из различных твердых отходов. Описывает технологию изготовления супергидрофобных вяжущих грунта и гипотезу изготовления новых супергидрофобных вяжущих грунта из твердых отходов. Дает оценку использованию этих видов супергидрофобных вяжущих грунта для дорожного строительства.

В [5] представлен обзор различных методов укрепления и стабилизации дисперсных грунтов. Авторы показывают, что добавление лигносульфоната, диоксида кремния и стальных шлаков значительно повышает прочность грунта и снижает его дисперсность. Также было установлено, что использование цемент-

ного клинкера, золы-уноса класса С, целиака и наноматериалов эффективно для укрепления и стабилизации дисперсных грунтов.

В [6] авторы указывают, что использование техногенных отходов при укреплении набухающих грунтов земляного полотна является устойчивым, безвредным для окружающей среды, менее дорогостоящим и эффективным при восстановлении инженерных свойств материалов земляного полотна. Этот обзор раскрывает возможность использования изученных отходов для укрепления и стабилизации набухающих грунтов.

В обзоре [7] рассматриваются исследования эффективности золы-уноса в качестве вяжущего для укрепления и стабилизации грунта и в улучшении механических характеристик набухающих грунтов.

В обзоре [8] предпринята попытка исследовать разнообразие твердых отходов, которые использовались для укрепления и стабилизации грунта в качестве вяжущего в сочетании с известью и цементом или без них, чтобы найти возможные способы использования твердых отходов на практике в геотехнических целях.

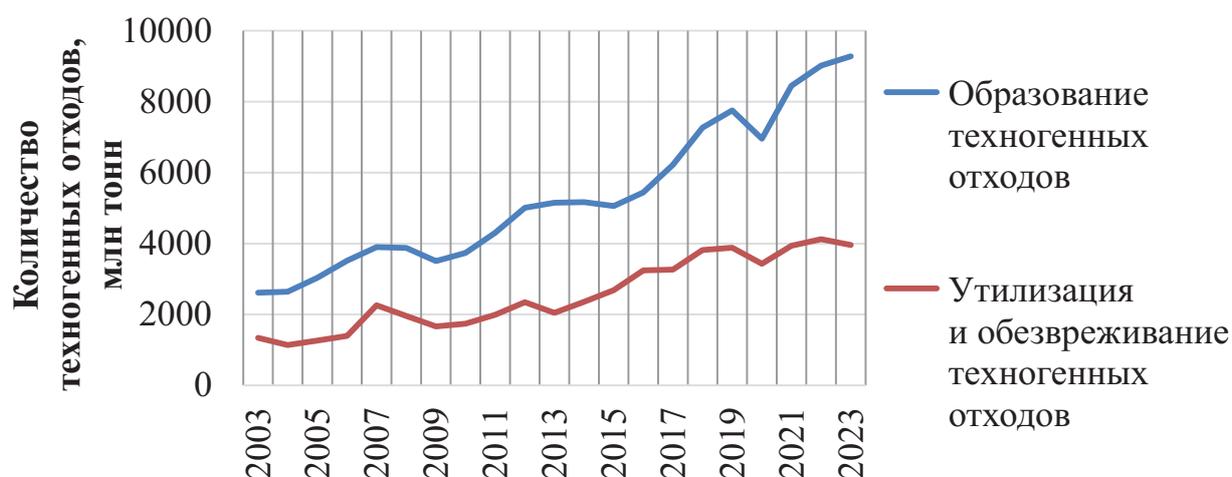


Рис. 2. Образование и утилизация техногенных отходов в РФ

Несмотря на растущий интерес к использованию техногенных отходов для укрепления и стабилизации грунтов, отсутствует систематический и всеобъемлющий обзор применения видов техногенных отходов в зависимости от вида грунта. Таким образом, существует необходимость в обзоре доступной литературы, чтобы обеспечить всестороннее понимание использования техногенных отходов для укрепления и стабилизации грунта. Такой обзор мог бы помочь в создании методов укрепления и стабилизации грунтов, которые были бы эффективными и долговечными при минимизации воздействия техногенных отходов на окружающую среду.

## Обзор литературы

### *Качественные характеристики укрепленных грунтов*

К основным качественным прочностным характеристикам укрепленных и стабилизированных грунтов относятся [9, 10]:

- *Прочность на сжатие.* Это одна из основных качественных характеристик, которая определяется путем нагружения стандартных образцов укрепленного грунта статической нагрузкой на прессе.
- *Морозостойкость.* Это отношение значения прочности на сжатие образцов, подверженных предварительному переменному замораживанию и оттаиванию, к значению прочности на сжатие. Данная характеристика особенно важна для оценки возможности применения материалов в условиях континентального и полярного климата.
- *Калифорнийское число CBR.* Показатель характеризует несущую способность грунта. Данная характеристика определяется на образцах, подвергнутых предварительному водонасыщению, с последующим вдавливанием штампа в образец укрепленного грунта.

Калифорнийское число CBR косвенно характеризует прочность материалов на сдвиг и их жесткость [11]. В исследованиях приведены эмпирические зависимости модуля упругости и CBR.

W. Heukelom и A. J. G. Klomp [12]

$$E = 10,342 \cdot CBR$$

Green and Hall [11]

$$E = 37,294 \cdot CBR^{0,71}$$

Witczak [12–13]

$$E = 20,684 \cdot CBR^{0,65}$$

Witczak [12–14]

$$E = 9,79 \cdot CBR$$

### *Виды и способы применения отходов*

Исследованиям по применению этих материалов посвящены работы различных ученых. В частности, в конструкциях автомобильных дорог можно эффективно применять:

- *Переработанный бетонный порошок (RCP)* – побочный продукт переработки бетона. Введение порошка в глинистые грунты в количестве 1–5 % повышает прочность на сжатие и растяжение при увеличении содержания RCP в смеси и сроков твердения [3].
- *Измельченный стеклянный порошок и известь.* Стеклянный порошок получают путем измельчения стекловолокна или различных отходов стекла. Введение стеклянного порошка (10% и 30%) в сочетании с известью (5% и 12%) в глинистые грунты снижает их дисперсность [3].
- *Лигносульфонат* — продукт технологической переработки растительного древесного сырья при производстве бумаги. Введение в глинистые грунты лигносульфоната в количестве до 1,5% с добавкой полипропиленового волокна или без него снижает дисперсность грунтов [3].

• *Пары кремнезема* — побочный продукт при производстве ферросилиция и кремниевых сплавов. Введение в глинистые грунты паров кремнезема в количестве 5–15% позволяет снизить их набухание и усадку [3].

• *Порошок из яичной скорлупы* — отходы, получаемые из куриных инкубаториев, ресторанов быстрого питания и гостиниц. Данный вид отхода содержит большое количество карбоната кальция. Известь из яичной скорлупы обеспечивает более высокий уровень прочности и жесткости по сравнению с обычной известью при стабилизации грунтов, в том числе в сочетании с молотым стеклом [8, 15].

• *Золошлаковые отходы тепловых электростанций* — продукты сжигания углей. Эти отходы представляют наибольший интерес, так как они имеют наибольшие объемы накопления в Российской Федерации, составляющие, по разным оценкам, около 1,1–1,7 млрд т (примерно 50% от общей массы отходов на хранении).

В различных источниках приводятся разные классификации этого вида отходов [18–25]. Наиболее широкое применение получили золы-уносы в качестве вяжущего или компонента комплексного вяжущего [19, 21, 22, 25–29].

Золошлаковые смеси можно рассматривать как техногенный грунт либо применять в виде компонента комплексных вяжущих путем предварительного высушивания и измельчения [25].

Введение в набухающие глинистые грунты сланцевой золы совместно с портландцементом в количестве 30% и 4% соответственно позволяет снизить набухание и линейную усадку, число пластичности, а также повысить прочностные характеристики обработанного грунта [24].

*Золы биомассы (BBA) и золы-уносы биомассы (BFA)* — отходы от сжигания древесных опилок, щепы, коры и др. Комплексная добавка в глинистые грунты золы биомассы (5% от

массы сухого грунта), извести (0,5% от массы сухого грунта) и раствора на основе нанокремнезема снижает количество извести до 66% и повышает физико-механические характеристики известь-грунтов [30].

*Геополимеры на основе зол-уносов* [31]. Геополимер получают путем активации золы-уноса щелочью, в результате которой на поверхности частицы золы-уноса образуются отверстия, которые заполняются более мелкими частицами. В дальнейшем щелочной раствор вступает во взаимодействие с частицами, расположенными внутри крупных частиц. Растворенные частицы золы-уноса образуют алюмосиликатный гель, обволакивающий элементы глинистого грунта. В результате этого взаимодействия в грунте образуется жесткая структура. При этом добавка золы-уноса составляет 25%.

*Золы рисовой шелухи, золы багассы и золы навоза.* Зола рисовой шелухи — побочный продукт рисовой мельницы, который получается при сжигании рисовой шелухи RHA. Зола багассы сахарного тростника (SCBA) образуется от сжигания отходов производства сахарозы из сахарного тростника. Зола коровьего навоза (CDA) образуется от сжигания отходов сельхозпредприятий.

Комплексное введение в глинистый грунт добавок из зол рисовой шелухи, багассы и коровьего навоза (7,5% от массы сухого грунта) увеличивает прочностные характеристики, а также возможность контролировать изменение объема [32].

*Золы бумажного шлама.* В работе [33] исследовано влияние разрыхления на величину набухания стабилизированной сульфатсодержащей глины. В качестве вяжущих использовались известь и зола бумажного шлама.

*Золы кофейной шелухи*

Виды отходов производства кофе:

- кофейная шелуха является побочным продуктом кофейной промышленности, она относится к внешней оболочке плодов кофейной вишни;

- отработанный кофейный порошок (отрабатанная кофейная гуща) относится к осадку, оставшемуся после извлечения кофейных зерен из кофейного раствора;

- зола кофейной шелухи (СНА) — это тип твердых отходов, которые образуются в результате переработки кофейных зерен на ферме или заводе.

Введение в набухающий глинистый грунт золы кофейной шелухи совместно с известью позволяет снизить число пластичности и повысить несущую способность в большей степени, чем при укреплении и стабилизации только известью (добавление 15% СНА в грунт, стабилизированный 6%-ной известью, увеличило значение CBR на 19,5%). Кроме того, снижаются деформации набухания и усадки [34].

Введение в набухающий глинистый грунт 20% золы кофейной шелухи позволяет увеличить CBR в 3 раза, до 3,1%, при предварительном водонасыщении и с 8,3% до 10,67% в сухом состоянии. Кроме того, при концентрации СНА (20%) процент набухания уменьшается с 10% до 5,7%, что указывает на значительное снижение, примерно на 43% [35].

*Биополимеры целлюлозы.* В работе [36] показана эффективность биополимера целлюлозы (CL) в стабилизации латеритного грунта (грунты с высоким содержанием гидратов окиси железа и алюминия (65–80%) и низким содержанием кремнезема). С увеличением количества целлюлозы до 3% от массы сухого грунта значение CBR увеличивается на 110,4% во влажном состоянии и на 34,95% в сухом [36].

*Золы багассы из сахарного тростника.* Содержат большое количество клетчатки и крем-

незема. В работах [8, 37] исследованы образцы с использованием золы багассы с различным содержанием гашеной извести (0%, 6%, 10%, 18% и 25% от массы сухого грунта) в соотношении 3:1 соответственно. Результаты исследования показали улучшение характеристик набухания и усадки, прочности при сжатии и калифорнийского числа (CBR) в возрасте 3, 7 и 28 сут.

*Золы из пальмового масла* — отход сжигания пустых плодовых гроздей (EFB), волокон и скорлупы от производства пальмового масла (POS). Содержит большое количество кремнезема (61,98%) и глинозема (28,35%).

Результаты показывают, что использование только золы (10–40%) для стабилизации глинистого грунта приводит к небольшому увеличению прочностных характеристик образцов, в то время как сочетание золы с цементом приводит к резкому увеличению прочности образцов при одинаковых сроках твердения и снижению пластичности [8, 38].

### Отходы пластика (ПЭТ)

В работе [39] исследовано применение ПЭТ в виде лент и крошки (около 5 мм), что позволяет повысить прочностные характеристики глинистого грунта. При этом использование большего количества пластиковых частиц (более 2%) в качестве армирующего материала значительно снижает прочность образца грунта. Добавление извести позволяет повысить прочностные характеристики. Использование ПЭТ в форме полос демонстрирует более высокую прочность и большую гибкость по отношению к приложенным нагрузкам по сравнению с ПЭТ в форме гранул.

### Заключение

Влияние добавления различных видов техногенных отходов на свойства грунта являет-

ся сложной и многогранной темой, имеющей важное значение для дорожного строительства в различных климатических условиях. В обзоре рассмотрены различные аспекты применения техногенных отходов для укрепления грунтов и сформулированы выводы:

1. Применение техногенных отходов в дорожном строительстве позволяет экономить сырьевые ресурсы и утилизировать большое количество отходов.

2. Отходы сильно отличаются по химическому, минеральному и гранулометрическому составу. Имеющиеся исследования выполнены в достаточно узких областях.

3. Эффективность применения техногенных отходов для укрепления грунтов зависит от вида отхода, необходимости его дополнительной обработки (высушивания, измельчения), вида грунта, расстояния транспортировки.

4. Недостаточно изучено влияние таких факторов, как увлажнение, высыхание, замерзание, оттаивание, на долговечность укрепленных грунтов.

5. Недостаточно исследовано влияние укрепленных грунтов на основе применения техногенных отходов на окружающую среду.

Основываясь на приведенных выше выводах, авторы полагают, что необходимы дополнительные исследования, чтобы расширить область применения техногенных отходов в дорожном строительстве в зависимости от вида грунта, конструктивного слоя автомобильной дороги и климатических условий района строительства.

### Библиографический список

1. Безрук В. М. Укрепление грунтов в дорожном и аэродромном строительстве. М.: Транспорт, 1971. 247 с.

2. Филатов М. М. Основы дорожного грунтоведения. М.: Гострансиздат, 1936. 233 с.

3. Информация о количестве техногенных отходов. URL: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste\\_statistics#Total\\_waste\\_generation](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics#Total_waste_generation) (дата обращения: 15.07.2024).

4. Fabrication of superhydrophobic soil stabilizers derived from solid wastes applied for road construction: A review / J. Lu [et al.] // *Transportation Geotechnics*. 2023. P. 40. DOI: 10.1016/j.trgeo.2023.100974

5. A systematic review of strategies for identifying and stabilizing dispersive clay soils for sustainable infrastructure / A. H. Vakili [et al.] // *Soil and Tillage Research*. 2024. 239 p. DOI: 10.1016/j.still.2024.106036

6. Tanyıldızı M., Uz V. E., Gökalp İ. Utilization of waste materials in the stabilization of expansive pavement subgrade: An extensive review // *Construction and Building Materials*. 2023. 398 p. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132435

7. Utilization of fly ash with and without secondary additives for stabilizing expansive soils: A review / S. Ahmad [et al.] // *Results in Engineering*. 2024. 22 p. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102079

8. Vijayan D. S., Parthiban D. Effect of Solid waste based stabilizing material for strengthening of Expansive soil: A review // *Environmental Technology & Innovation*. 2020. 20 p. DOI: 10.1016/j.eti.2020.101108

9. Сокорнов А. А., Коньков А. Н., Лейкин А. П. Проведение стабилметрических испытаний дисперсных грунтов как строительных материалов // *Путевой навигатор*. 2021. № 46 (72). С. 28–36.

10. Оптимизация гранулометрического состава песчаного грунта при устройстве основания дорожных одежд из цементогрунта / С. А. Куюков [и др.] // *Путевой навигатор*. 2021. № 46 (72). С. 44–52.

11. Семенова Т. В., Долгих Г. В., Полугородник Б. Н. Применение калифорнийского числа несущей способности и динамического конусного пенетromетра для оценки качества уплотнения грунта // *Вестник СибАДИ*. 2014. № 1 (35). С. 59–66.

12. Heukelom, W., Klomp, A. J. G. Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements During and After

Construction // Proc. of 1st International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements. 1962.

13. Green J.L., Hall J.W. Nondestructive Vibratory Testing of Airport Pavements. Vol. I: Experimental Test Results and Development of Evaluation Methodology and Procedure // Federal Aviation Administration Report No. FAA-RD-73-205-1. 1975. 214 p.

14. Witzak M. W., Qi X., Mirza M. W. Use of Nonlinear Subgrade Modulus in AASHTO Design Procedure // Journal of Transportation Engineering. 1995. No. 3. P. 273–282.

15. Suitability of Using California Bearing Ratio Test to Predict Resilient Modulus / B. Sukumaran [at al.] // Proceedings: Federal Aviation Administration Airport Technology Transfer Conference. 2002. 9 p.

16. Puppala A. J. Estimating Stiffness of Subgrade and Unbound Materials for Pavement Design // NCHRP Synthesis 382, Transportation Research Board, National Research Council. Washington, 2008. 139 p.

17. Munirwan R. P., Jaya R. P., Munirwansyah R. Performance of eggshell powder addition to clay soil for stabilization // Int. J. Recent Technol. Eng. 2019. No. 8. P. 532–535. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123648

18. Optimization of fly ash based soil stabilization using secondary admixtures for sustainable road construction / Renjith R. [at al.] // Journal of Cleaner Production. 2021. 294 p.

19. Лунев А.А. Обоснование расчетных значений механических характеристик золошлаковых смесей для проектирования земляного полотна: дисс. ... канд. техн. наук. Омск, 2019. 192 с.

20. Сиротюк В.В. Особенности свойств золоносных Экибастузских углей в связи с их применением в дорожном строительстве // Строительство и эксплуатация дорог: межвуз. сб. Новосибирск: НИСИ, 1977. С. 78–86.

21. Сиротюк В. В. Стандартизация и перспективы использования золошлаков энергетики для дорожного строительства в России // Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование:

мат-лы III науч.-практ. семинара (22–23 апреля 2010 г.). М.: Издательский дом МЭИ, 2010. С. 58–59.

22. Putilova I. V. Current state of the coal ash handling problem in Russia and abroad, aspects of the coal ash applications in hydrogen economy // International Journal of Hydrogen Energy. 2023. P. 31040–31048. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.04.230

23. Effect of using Oil Shale Ash on geotechnical properties of cement-stabilized expansive soil for pavement applications / S.R. Rabab'ah [et al.] // Case Studies in Construction Materials. 2023. 19 p. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02508

24. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве / Н.И. Ватин [и др.] // Magazine of Civil Engineering. 2011. № 4. С. 16–21. DOI: 10.5862/MCE.22.2

25. Optimization of fly ash based soil stabilization using secondary admixtures for sustainable road construction / R. Renjith [at al.] // Journal of Cleaner Production. 2021. 294 p. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126264.

26. Слободчикова Н.А., Лофлер М., Плюта К.В. Получение неорганического вяжущего на основе отходов промышленного производства // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость: научный журнал. 2017. Т. 7. № 2. С. 62–67.

27. Прогнозирование прочностных характеристик укрепленных золошлаковых смесей ТЭС неорганическими вяжущими материалами / Ю. Г. Лазарев [и др.] // Путевой навигатор. 2024. № 59 (85). С. 52–58.

28. Бирюков Ю.А., Бирюков А.Н., Титеев И.С. Вторичные строительные материалы в транспортном строительстве: анализ их применения и переработки при реконструкции объектов // Строительные и дорожные машины. 2023. № 10. С. 51–62.

29. Слободчикова Н.А., Лофлер М. Методики подбора составов грунтов, укрепленных известью, для дорожного строительства // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2018. Т. 8. № 2. С. 141–147.

30. Geotechnical and engineering properties of expansive clayey soil stabilized with biomass ash and nanomaterials for its application in structural road layers / J. L. Díaz-López [at al.] // *Geomechanics for Energy and the Environment*. 2023. 36 p. DOI: 10.1016/j.gete.2023.100496
31. Turkane S.D., Chouksey S.K. Design of low volume road pavement of stabilized low plastic soil using fly ash geopolymer // *Materials Today: Proceedings*. 2022. No. 65. Part 2. P. 1154–1160. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.167
32. Stabilization of alluvial soil for subgrade using rice husk ash, sugarcane bagasse ash and cow dung ash for rural roads / A. K. Yadav [at al.] // *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2017. No. 10. P. 254–261. DOI: 10.1016/j.ijprt.2017.02.001
33. Rahmat M.N., Kinuthia J.M. Effects of mellowing sulfate-bearing clay soil stabilized with wastepaper sludge ash for road construction // *Engineering Geology*. 2011. No. 117. P. 170–179. DOI: 10.1016/j.enggeo.2010.10.015.
34. Utilization of coffee husk ash for soil stabilization: A systematic review / R. P. Munirwan [at al.] // *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2022. 128 p. DOI: 10.1016/j.pce.2022.103252.
35. Atahu M.K., Saathoff F., Gebissa A. Strength and compressibility behaviors of expansive soil treated with coffee husk ash // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019. No. 11, iss. 2. P. 337–348. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.11.004.
36. Dhawale A.W., Banne S.P. Laterite soil stabilization using cellulose biopolymer // *Materials Today: Proceedings*. 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.07.062
37. Remediation of expansive soils using agricultural waste bagasse ash / H. Hasan [at al.] // *Procedia Eng*. 2016. P. 1368–1375. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.161
38. Stabilization of clayey soil using ultrafine palm oil fuel ash (POFA) and cement / S. Pourakbar [at al.] // *Transportation Geotechnics*. 2015. Vol. 3. P. 24–35. DOI: 10.1016/j.trgeo.2015.01.002
39. Koohmishi M., Palassi M. Mechanical Properties of Clayey Soil Reinforced with PET Considering the Influence of Lime-Stabilization // *Transportation Geotechnics*. 2022. 33 p. DOI: 10.1016/j.trgeo.2022.100726

Дата поступления: 23.07.2024

Решение о публикации: 16.08.2024

**Контактная информация:**

СЛОБОДЧИКОВА Надежда Анатольевна — канд.

техн. наук, доцент; NSlobodchikova@rambler.ru

КЛЮЕВ Сергей Васильевич — докт. техн. наук,

профессор; klyuyev@yandex.ru

ПЛЮТА Ксения Викторовна — эксперт;

kv\_plyuta@mail.ru

КЛЮЕВ Александр Васильевич — канд. техн.

наук, доцент; klyuyevav@yandex.ru

## The use of man-made waste in strengthening the soils of highways

S. V. Klyuyev<sup>1,2</sup>, N. A. Slobodchikova<sup>2</sup>, K. V. Pluta<sup>2</sup>, A. V. Klyuyev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, 46, Kostyukova st., Belgorod, Russia

<sup>2</sup> RUDN University, 6, Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russia

<sup>3</sup> Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov st., Irkutsk, Russia

**For citation:** Klyuyev S. V., Slobodchikova N. A., Pluta K. V., Klyuyev A. V. The use of man-made waste in strengthening the soils of highways // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 775–786. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-775-786

### Abstract

**Purpose:** analysis of the possibility of using man-made waste to strengthen and stabilize the soils of road surfaces and the roadbed. The use of man-made waste in soil compositions reinforced with inorganic binders makes it possible to reduce the cost of construction and dispose of man-made waste. **Objective:** to review the available literature for a comprehensive understanding of the possibility of using man-made waste to strengthen and stabilize the soil. **Results:** the article discusses the ways of using various types of man-made waste to strengthen soils. The ash and slag wastes of the CHP are the most studied. Agricultural wastes such as coffee husk ash, bagasse ash, and cellulose are also of interest. At the same time, the available research has been carried out in rather narrow areas, there is not enough research in the field of assessing the durability of materials under the influence of various factors (moisture-drying, freezing-thawing, dynamic load from vehicles, accumulation of plastic deformations, etc.), there is not enough research in the field of assessing the impact of materials on the environment. Many studies have noted that some types of waste, such as rice husk ash, blast furnace slag and fly ash, need additional research in terms of increasing strength. **Practical significance:** this review can help in the creation of methods for strengthening and stabilizing soils that would be effective and durable while minimizing the impact of man-made waste on the environment. Additional research is needed to expand the scope of man-made waste in road construction, depending on the type of soil, the structural layer of the highway and the climatic conditions of the construction area.

**Keywords:** soil strengthening, soil stabilization, man-made waste, reinforced soil compositions

### References

1. Bezruk V. M. *Ukrepnenie gruntov v dorozhnom i aerodromnom stroitel'stve*. M.: Transport, 1971. 247 s. (In Russian)
2. Filatov M.M. *Osnovy dorozhnogo gruntovedeniya*. M.: Gostransizdat, 1936. 233 s. (In Russian)
3. Informaciya o kolichestve tekhnogennyh othodov. URL: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste\\_statistics#Total\\_waste\\_generation](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics#Total_waste_generation) (data obrashcheniya: 15.07.2024). (In Russian)
4. Fabrication of superhydrophobic soil stabilizers derived from solid wastes applied for road construction: A review / J. Lu [et al.] // *Transportation Geotechnics*. 2023. P. 40. DOI: 10.1016/j.trgeo.2023.100974.
5. A systematic review of strategies for identifying and stabilizing dispersive clay soils for sustainable infrastructure / A.H. Vakili [et al.] // *Soil and Tillage Research*. 2024. P.239. DOI: 10.1016/j.still.2024.106036
6. Tanyıldızı M., Uz V.E., Gökalp İ. Utilization of waste materials in the stabilization of expansive pavement subgrade: An extensive review // *Construction and Building Materials*. 2023. 398 p. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132435
7. Utilization of fly ash with and without secondary additives for stabilizing expansive soils: A review / S. Ahmad [et al.] // *Results in Engineering*. 2024. 22 p. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102079
8. Vijayan D.S., Parthiban D. Effect of Solid waste based stabilizing material for strengthening of

Expansive soil: A review // *Environmental Technology & Innovation*. 2020. 20 p. DOI: 10.1016/j.eti.2020.101108

9. Sokornov A.A., Kon'kov A.N., Lejkin A.P. Provedenie stabilometricheskikh ispytaniy dispersnyh gruntov kak stroitel'nyh materialov // *Putevoj navigator*. 2021. No. 46 (72). S. 28–36. (In Russian)

10. Optimizaciya granulometricheskogo sostava peschanogo grunta pri ustrojstve osnovaniya dorozhnyh odezhd iz cementogrunta / S. A. Kuyukov [i dr.] // *Putevoj navigator*. 2021. No. 46 (72). S. 44–52. (In Russian)

11. Semenova T.V., Dolgih G.V., Polugorodnik B.N. Primenenie kalifornijskogo chisla nesushchej sposobnosti i dinamicheskogo konusnogo penetrometra dlya ocenki kachestva uplotneniya grunta // *Vestnik SibADI*. 2014. No. 1 (35). (In Russian)

12. Heukelom, W., Klomp, A. J. G. Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements During and After Construction // *Proc. of 1st International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements*. 1962.

13. Green J.L., Hall J.W. Nondestructive Vibratory Testing of Airport Pavements. Vol. I: Experimental Test Results and Development of Evaluation Methodology and Procedure // *Federal Aviation Administration Report No. FAA-RD-73-205-1*. 1975. 214 p.

14. Witczak M.W., Qi X., Mirza M.W. Use of Nonlinear Subgrade Modulus in AASHTO Design Procedure // *Journal of Transportation Engineering*. 1995. No. 3. P. 273–282.

15. Suitability of Using California Bearing Ratio Test to Predict Resilient Modulus / B. Sukumaran [at al.] // *Proceedings: Federal Aviation Administration Airport Technology Transfer Conference*. 2002. 9 p.

16. Puppala A. J. Estimating Stiffness of Subgrade and Unbound Materials for Pavement Design // *NCHRP Synthesis 382, Transportation Research Board, National Research Council*. Washington, 2008. 139 p.

17. Munirwan R.P., Jaya R.P., Munirwansyah R. Performance of eggshell powder addition to clay soil for stabilization // *Int. J. Recent Technol. Eng*. 2019. No. 8. P. 532–535. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123648

18. Optimization of fly ash based soil stabilization using secondary admixtures for sustainable road construction / Renjith R. [at al.] // *Journal of Cleaner Production*. 2021. 294 p.

19. Lunev A. A. Obosnovanie raschetnyh znachenij mekhanicheskikh harakteristik zoloshlakovyh smesey dlya proektirovaniya zemlyanogo polotna: diss. ... kand. tekhn. nauk. Omsk, 2019. 192 s. (In Russian)

20. Sirotiyuk V.V. Osobennosti svoystv zolunosy Ekibastuzskih uglej v svyazi s ih primeneniem v dorozhnom stroitel'stve // *Stroitel'stvo i ekspluatatsiya dorog: mezhvuz. sb. Novosibirsk: NISI*, 1977. S. 78–86 (In Russian)

21. Sirotiyuk V.V. Standartizaciya i perspektivy ispol'zovaniya zoloshlakov energetiki dlya dorozhnogo stroitel'stva v Rossii // *Zoloshlaki TES: udalenie, transport, pererabotka, skladirovanie: mat-ly III nauch.-prakt. seminar (22–23 aprelya 2010 g.)*. M.: Izdatel'skij dom MEI, 2010. S. 58–59. (In Russian)

22. Putilova I. V. Current state of the coal ash handling problem in Russia and abroad, aspects of the coal ash applications in hydrogen economy // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. P. 31040–31048. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.04.230

23. Effect of using Oil Shale Ash on geotechnical properties of cement-stabilized expansive soil for pavement applications / S.R. Rabab'ah [et al.] // *Case Studies in Construction Materials*. 2023 19 p. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02508

24. Primenenie zol i zoloshlakovyh othodov v stroitel'stve / N.I. Vatin [i dr.] // *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 4. S. 16–21. DOI: 10.5862/MCE.22.2 (In Russian)

25. Optimization of fly ash based soil stabilization using secondary admixtures for sustainable road construction / R. Renjith [at al.] // *Journal of Cleaner Production*. 2021. 294 p. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126264.

26. Slobodchikova N.A., Lofler M., Plyuta K.V. Poluchenie neorganicheskogo vyazhushchego na osnove othodov promyshlennogo proizvodstva // *Izvestiya*

vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost': nauchnyj zhurnal. 2017. T. 7. No. 2. S. 62–67. (In Russian)

27. Prognozirovanie prochnostnyh karakteristik ukreplennyh zoloshlakovyh smesey TEC neorganichesкими vyazhushchimi materialami / Yu.G. Lazarev [i dr.] // Putevoj navigator. 2024. No. 59 (85). S. 52–58. (In Russian)

28. Biryukov Yu. A., Biryukov A.N., Titeev I.S. Vtorichnye stroitel'nye materialy v transportnom stroitel'stve: analiz ih primeneniya i pererabotki pri rekonstrukcii ob'ektov // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. 2023. No. 10. S. 51–62. (In Russian)

29. Slobodchikova N.A., Lofler M. Metodiki podbora sostavov gruntov, ukreplennyh izvest'yu, dlya dorozhnogo stroitel'stva // Izvestiya vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'. 2018. T. 8. No. 2. S. 141–147. (In Russian)

30. Geotechnical and engineering properties of expansive clayey soil stabilized with biomass ash and nanomaterials for its application in structural road layers / J.L. Díaz-López [at al.] // Geomechanics for Energy and the Environment. 2023. 36 p. DOI: 10.1016/j.gete.2023.100496

31. Turkane S.D., Chouksey S.K. Design of low volume road pavement of stabilized low plastic soil using fly ash geopolymers // Materials Today: Proceedings. 2022. No. 65. Part 2. P. 1154–1160. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.167

32. Stabilization of alluvial soil for subgrade using rice husk ash, sugarcane bagasse ash and cow dung ash for rural roads / A.K. Yadav [at al.] // International Journal of Pavement Research and Technology. 2017. No. 10. P. 254–261. DOI: 10.1016/j.ijprt.2017.02.001

33. Rahmat M.N., Kinuthia J.M. Effects of mellowing sulfate-bearing clay soil stabilized with wastepaper sludge ash for road construction // Engineering Geology. 2011. No. 117. P. 170–179. DOI: 10.1016/j.enggeo.2010.10.015.

34. Utilization of coffee husk ash for soil stabilization: A systematic review / R.P. Munirwan [at al.] // Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. 2022. 128 p. DOI: 10.1016/j.pce.2022.103252.

35. Atahu M.K., Saathoff F., Gebissa A. Strength and compressibility behaviors of expansive soil treated with coffee husk ash // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. No. 11, iss. 2. P. 337–348. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.11.004.

36. Dhawale A.W., Banne S.P. Laterite soil stabilization using cellulose biopolymer // Materials Today: Proceedings. 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.07.062

37. Remediation of expansive soils using agricultural waste bagasse ash / H. Hasan [at al.] // Procedia Eng. 2016. P. 1368–1375. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.161

38. Stabilization of clayey soil using ultrafine palm oil fuel ash (POFA) and cement / S. Pourakbar [at al.] // Transportation Geotechnics. 2015. Vol. 3. P. 24–35. DOI: 10.1016/j.trgeo.2015.01.002

39. Koohmishi M., Palassi M. Mechanical Properties of Clayey Soil Reinforced with PET Considering the Influence of Lime-Stabilization // Transportation Geotechnics. 2022. 33 p. DOI: 10.1016/j.trgeo.2022.100726

Received: 23.07.2024

Accepted: 16.08.2024

#### Author's information:

Nadezhda A. SLOBODCHIKOVA — PhD in Engineering, Associate Professor;  
NSlobodchikova@rambler.ru

Sergey V. KLYUEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; klyuyev@yandex.ru

Ksenia V. PLUTA — expert; kv\_plyuta@mail.ru

Alexander V. KLYUYEV — PhD in Engineering, Associate Professor; klyuyevav@yandex.ru