

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

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

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/26SATS226.pdf>

DOI: 10.15862/26SATS226 (<https://doi.org/10.15862/26SATS226>)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Углова, Е. В. Холодные асфальтобетонные смеси со структурирующей нанодобавкой для всесезонного ремонта дорожных покрытий / Е. В. Углова, С. А. Чернов // Транспортные сооружения. — 2026. — Т. 13. — № 2. — URL: <https://t-s.today/PDF/26SATS226.pdf>. DOI: 10.15862/26SATS226.

**For citation:**

Uglova E.V., Chernov S.A. Cold asphalt-concrete mixtures with structuring nano-additive for all-season repair of road surfaces. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2026;13(2): 26SATS226. Available at: <https://t-s.today/PDF/26SATS226.pdf>. DOI: 10.15862/26SATS226. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 625.8

**Углова Евгения Владимировна**

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия  
Профессор кафедры «Автомобильные дороги»  
Доктор технических наук, профессор  
E-mail: [uglova.ev@yandex.ru](mailto:uglova.ev@yandex.ru)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4768-2427>  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=456806](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=456806)  
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57190176042>

**Чернов Сергей Анатольевич**

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия

## **Холодные асфальтобетонные смеси со структурирующей нанодобавкой для всесезонного ремонта дорожных покрытий**

**Аннотация.** Введение. Актуальность обусловлена необходимостью повышения долговечности ямочного ремонта дорог в условиях частых переходов температуры через 0°C. Цель исследования — разработка состава всесезонной холодной асфальтобетонной смеси с использованием вторичных материалов и наноструктурирующей добавки для обеспечения высокой эксплуатационной надежности городских покрытий. Сформулированы задачи по подбору минеральной части смеси с различными материалами, разработке жидкого битумно-полимерного вяжущего и оценке их свойств.

**Материалы и методы.** В качестве заполнителей использовались гранитный щебень, песок, конверторный шлак и фрезерованный асфальтовый лом. Органическое вяжущее — жидкий битум СГ 70/130, модифицированный полимером СБС и нанодобавкой «Мультигрейд фуллерен». Методы исследования включали сканирующую электронную микроскопию (SEM), метод Rolling Bottle Test для оценки адгезионных свойств вяжущего, испытания холодного асфальтобетона на колееобразование и истираемость по методу Prall.

**Результаты исследования.** Установлено, что введение нанодобавки через ультразвуковое диспергирование создает устойчивую пространственную сетку в битумной матрице, повышая адгезионные свойства жидкого битумно-полимерного вяжущего в 2,8 раза по сравнению с контрольным образцом (сохранение пленки до 95 %). Разработаны оптимальные составы

холодной асфальтобетонной смеси АХ16. Экспериментально подтверждена допустимая слеживаемость холодной асфальтобетонной смеси. Отмечен стабильный рост эксплуатационных показателей холодных асфальтобетонов. Установлено, что применение шлаковых материалов позволило снизить глубину колеи с 8,1 мм до 4,8 мм и уменьшить показатель истираемости на 30,5 %.

**Выводы.** Разработанные составы холодных асфальтобетонных смесей являются эффективной альтернативой литым смесям. Научная ценность заключается в обосновании синергетического эффекта наноструктурированного вяжущего и вторичных материалов. Рекомендуются внедрение смесей для оперативного ремонта дорожной сети городов, что обеспечит долговечность ремонтного слоя и снижение эксплуатационных затрат.

**Ключевые слова:** холодные смеси; ямочный ремонт; вторичные материалы; нанодобавка; фуллерены; колесобразование; истираемость

## Введение

На улично-дорожной сети городов в качестве материала верхнего слоя покрытия используются щебеночно-мастичные асфальтобетонные смеси или смеси, запроектированные по методу Маршалла с номинальным максимальным размером зерен щебня 16 или 22 мм. При этом к применяемым асфальтобетонам предъявляются требования по показателям эксплуатационных свойств, учитывающие их реальные условия эксплуатации [1; 2].

Однако, ремонтные асфальтобетонные смеси, которые используются в осенне-зимне-весенний периоды для ликвидации дефектов, подбираются без учета климатических факторов.

Климатические условия за последние 20 лет претерпели существенные изменения.

Нередки случаи, когда температура ночью опускается ниже нуля градусов Цельсия, а в дневное время суток вновь поднимается к положительным отметкам. Такие частые переходы через ноль приводят к расшатыванию структуры асфальтобетона с последующим выкрашиванием и образованием ямочности.

По данным таблицы 1 количество переходов через ноль градусов Цельсия в осенне-зимне-весенний период времени в ряде городов центральной и южной части России составляет не менее 80, что негативно сказывается на состоянии дорожного покрытия.

Отсутствие снежного покрова, частые переходы через ноль градусов Цельсия и воздействие шипованных шин колес автомобилей лишь ускоряют процесс разрушения структуры асфальтобетонного покрытия [3; 4], как улично-дорожной сети города, так и автомагистралей. С целью оперативного устранения дефектов на покрытии традиционно используют литые асфальтобетонные смеси.

Литые асфальтобетонные смеси представляют собой смеси с высоким содержанием минерального порошка и битума, выпускаются при температуре 200–220°C, транспортируются в специальных установках-кехерах и не требуют уплотнения при укладке. Такие смеси возможно применять при температуре до минус 10°C без предварительной обработки мест дефекта. Однако, как правило, литые смеси выступают в качестве временного материала, так как обладают низкой деформативной устойчивостью при высоких летних температурах, что приводит к образованию волн и наплывов в зонах торможения и разгона. Альтернативой литым асфальтобетонным смесям для применения на улично-дорожной сети городов могут служить холодные асфальтобетонные смеси, приготовленные с применением вторичных материалов и структурирующей нанодобавки.

Таблица 1

Количество переходов через 0°C за осенне-зимне-весенний период

| Год наблюдения    | Количество перехода через 0°C за осенне-зимне-весенний период |         |      |        |         |       |
|-------------------|---------------------------------------------------------------|---------|------|--------|---------|-------|
|                   | январь                                                        | февраль | март | ноябрь | декабрь | всего |
| г. Ростов-на-Дону |                                                               |         |      |        |         |       |
| 2020              | 25                                                            | 16      | 12   | 15     | 28      | 96    |
| 2021              | 16                                                            | 10      | 21   | 22     | 12      | 81    |
| 2022              | 17                                                            | 12      | 26   | 7      | 17      | 79    |
| 2023              | 30                                                            | 24      | 8    | 4      | 12      | 78    |
| 2024              | 12                                                            | 29      | 14   | 5      | 24      | 84    |
| 2025              | 16                                                            | 9       | 7    | —      | 19      | 51    |
| Среднее за период |                                                               |         |      |        |         | 78    |
| г. Краснодар      |                                                               |         |      |        |         |       |
| 2020              | 17                                                            | 23      | 12   | 20     | 28      | 90    |
| 2021              | 23                                                            | 10      | 5    | 16     | 3       | 57    |
| 2022              | 22                                                            | 20      | 24   | 8      | 22      | 86    |
| 2023              | 44                                                            | 26      | 4    | 2      | 10      | 86    |
| 2024              | 15                                                            | 23      | 8    | 8      | 20      | 74    |
| 2025              | 24                                                            | 22      | 7    | —      | 35      | 88    |
| Среднее за период |                                                               |         |      |        |         | 80    |
| г. Новороссийск   |                                                               |         |      |        |         |       |
| 2020              | 8                                                             | 2       | —    | —      | 16      | 26    |
| 2021              | 4                                                             | 13      | 4    | —      | 2       | 23    |
| 2022              | 13                                                            | —       | 21   | —      | 2       | 36    |
| 2023              | 6                                                             | 16      | —    | —      | 4       | 26    |
| 2024              | 10                                                            | —       | 4    | 6      | 10      | 30    |
| 2025              | 8                                                             | 30      | 9    | —      | 15      | 62    |
| Среднее за период |                                                               |         |      |        |         | 34    |
| г. Воронеж        |                                                               |         |      |        |         |       |
| 2020              | 30                                                            | 16      | 19   | 11     | 10      | 86    |
| 2021              | 12                                                            | 10      | 33   | 14     | 13      | 82    |
| 2022              | 14                                                            | 29      | 22   | 7      | 11      | 83    |
| 2023              | 9                                                             | 18      | 29   | 7      | 11      | 74    |
| 2024              | 9                                                             | 18      | 30   | 14     | 17      | 88    |
| 2025              | 12                                                            | 3       | 13   | 13     | 23      | 64    |
| Среднее за период |                                                               |         |      |        |         | 80    |
| г. Москва         |                                                               |         |      |        |         |       |
| 2020              | 37                                                            | 28      | 14   | 12     | 9       | 100   |
| 2021              | 14                                                            | 6       | 33   | 19     | 8       | 80    |
| 2022              | 6                                                             | 28      | 34   | 11     | 5       | 84    |
| 2023              | 7                                                             | 11      | 17   | 3      | 10      | 48    |
| 2024              | 6                                                             | 17      | 34   | 18     | 25      | 100   |
| 2025              | 16                                                            | 9       | 17   | 11     | 15      | 68    |
| Среднее за период |                                                               |         |      |        |         | 80    |

Составлено автором

Холодные асфальтобетонные смеси представляют собой смесь минеральных материалов с жидким или эмульгированным вяжущим, перемешанных в холодном виде до однородности, способные сохранять длительное время рыхлое состояние без воздействия нагрузки. Такие смеси могут применяться при температуре воздуха до минус 15°C [5–7].

Целью исследования является разработка состава холодной асфальтобетонной смеси, содержащей вторичные материалы и структурирующую нанодобавку, обеспечивающего высокую эксплуатационную надежность и долговечность холодного асфальтобетона в качестве всесезонного материала для ремонта асфальтобетонных покрытий улично-дорожной сети городов. Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить подбор минеральной части холодной асфальтобетонной смеси с применением фрезерованного асфальтового лома;
- разработать жидкое битумно-полимерное вяжущее с нанодобавкой и изучить его физико-химические и реологические свойства;
- выполнить экспериментальные исследования с оценкой влияния органического вяжущего с нанодобавкой на свойства холодного асфальтобетона;
- экспериментальным путем определить оптимальное содержание компонентов холодных асфальтобетонных смесей, обеспечивающее высокие показатели физико-механических и эксплуатационных свойств исследуемых асфальтобетонов;
- обосновать эффективность применения холодных асфальтобетонов как альтернативного материала для ремонта покрытий улично-дорожной сети городов.

Применение холодных асфальтобетонных смесей в качестве альтернативного материала для ремонта покрытий улично-дорожной сети городов возможно за счет особенностей проектирования их состава и применения органических вяжущих с добавками, обеспечивающими высокие адгезионные и когезионные связи [8].

### Материалы и методы

Подбор кривой зернового состава минеральной части холодной асфальтобетонной смеси выполнялся в соответствии с ГОСТ Р 70648-2023<sup>1</sup> как для смеси с номинальным максимальным размером зёрен 16 мм, предназначенной для всесезонной ликвидации выбоин в покрытии. В качестве минерального заполнителя применялся гранитный щебень различных фракций, песок дробленый и минеральный порошок марки МП-1. Вторичные материалы, используемые при приготовлении холодных асфальтобетонных смесей, были представлены фрезерованным асфальтовым ломом (ФАЛ) и конверторным шлаком черной металлургии различной гранулометрии [9; 10]. В качестве органического вяжущего использовалось жидкое битумно-полимерное вяжущее, соответствующее требованиям нормативно-технической документации к марке СГ 70/130. Структурирующая нанодобавка представляла собой концентрат, состоящий из гидратированных наночастиц углерода в различных аллотропных формах, фуллеренов, антиоксидантов и поверхностно-активных веществ. Система компонентов представляет собой не случайную смесь наночастиц, а единый целенаправленно подобранный механизм, где каждый аллотроп выполняет свою специфическую функцию.

Благодаря гидроксильрованным производным графена внутри органического вяжущего создается структурная сетка и улучшаются эксплуатационные свойства холодного асфальтобетона. Гидроксильные группы на поверхности минерального материала создают водородные связи с активными центрами, которые увеличивают адгезионные свойства вяжущего, а, следовательно, и водостойкость холодного асфальтобетона после формирования его структуры.

Кроме этого, графеновые слои, образуемые на поверхности тонкой битумной пленки, замедляют процесс старения органического вяжущего и предотвращают разрушение молекулярных цепочек асфальтенов под воздействием ультрафиолета. Наличие фуллеренов позволяет регулировать процесс набора прочности холодной асфальтобетонной смеси, повышает устойчивость к колееобразованию и трещинообразованию при эксплуатации холодного асфальтобетона.

---

<sup>1</sup> ГОСТ Р 70648-2023 Дороги автомобильные общего пользования. Смесей холодных асфальтобетонных и асфальтобетон. Общие технические условия

На первом этапе исследований был выполнен подбор минеральной части холодной асфальтобетонной смеси на гранитных минеральных материалах (традиционная смесь, рецепт 1), а затем, с учетом допустимых отклонений от рецепта 1, были выполнены подборы минеральной части на материале из фрезерованного асфальтового лома (рецепт 2), на шлаковом материале (рецепт 3), а также фрезерованном асфальтовом ломе и шлаковом материале вместе (рецепт 4). Процентное содержание компонентов минеральной части каждого из вариантов смеси представлено в таблице 2.

**Таблица**

**Процентное содержание компонентов минеральной части подобранных рецептов холодной асфальтобетонной смеси**

| Рецепт 1            |                       | Рецепт 2            |                       | Рецепт 3                     |                       | Рецепт 4                   |                       |
|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|
| вид материала       | количество в смеси, % | вид материала       | количество в смеси, % | вид материала                | количество в смеси, % | вид материала              | количество в смеси, % |
| Щебень 11,2–16,0 мм | 20                    | ФАЛ 11,2–16,0 мм    | 17                    | Щебень шлаковый 11,2–16,0 мм | 23                    | ФАЛ 11,2–16,0 мм           | 25                    |
| Щебень 8,0–11,2 мм  | 15                    | ФАЛ 8,0–11,2 мм     | 15                    | Щебень шлаковый 8,0–11,2 мм  | 17                    | ФАЛ 8,0–11,2 мм            | 17                    |
| Щебень 4,0–8,0 мм   | 11                    | ФАЛ 4,0–8,0 мм      | 14                    | Щебень шлаковый              | 17                    | Щебень шлаковый 4,0–8,0 мм | 17                    |
| Песок дробленый     | 50                    | Песок дробленый     | 51                    | Песок шлаковый               | 39                    | Песок шлаковый             | 37                    |
| Минеральный порошок | 4                     | Минеральный порошок | 3                     | Минеральный порошок          | 4                     | Минеральный порошок        | 4                     |

Составлено автором

Подобранные кривые зернового состава минеральной части исследуемых холодных асфальтобетонных смесей представлены в таблице 3.

**Таблица**

**Полные проходы подобранных кривых зернового состава минеральной части исследуемых рецептов холодной асфальтобетонной смеси**

| Размер ячеек, мм | Полные проходы, %                         |          |          |          |          |
|------------------|-------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|
|                  | Требования ГОСТ Р 70648-2023 к смеси АХ16 | Рецепт 1 | Рецепт 2 | Рецепт 3 | Рецепт 4 |
| 22,4             | 100                                       | 100,0    | 100,0    | 100,0    | 100,0    |
| 16,0             | от 90 до 100                              | 100,0    | 100,0    | 100,0    | 100,0    |
| 11,2             | от 70 до 90                               | 81,0     | 83,8     | 78,1     | 76,2     |
| 4,0              | от 40 до 58                               | 49,3     | 49,4     | 44,1     | 42,5     |
| 2,0              | от 35 до 45                               | 36,0     | 35,6     | 40,9     | 39,0     |
| 0,125            | от 7 до 20                                | 10,9     | 10,0     | 10,8     | 10,4     |
| 0,063            | от 6 до 12                                | 7,5      | 6,6      | 6,5      | 6,3      |

Составлено автором

Следующим этапом исследований была разработка жидкого битумно-полимерного вяжущего марки СГ 70/130. Технология приготовления вяжущего состояла из нескольких этапов. Сначала в керосин вводилась нанодобавка «Мультигрейд фуллерен» при помощи ультразвуковой обработки в течение 60 минут, а затем осуществлялось постепенное введение порошка полимера СБС при температуре 60–70°C и их интенсивное механическое перемешивание до однородного гелеобразного состояния. Фуллерены в гелеобразном растворе равномерно распределяются в объеме и выступают в роли антиоксидантов.

Вторым этапом было объединение гелеобразного раствора полимера с вязким дорожным битумом марки БНД 70/100 при помощи лабораторного смесителя Silverson L5M, обеспечивающего высокую сдвиговую нагрузку для гомогенизации системы. Условная вязкость полученного

жидкого битумно-полимерного вяжущего составляла 76 секунд. Содержание полимера СБС составляло 2,8 %, нанодобавки «Мультигрейд фуллерен» 0,07 % и керосина 15 % в перерасчёте от общего количества вяжущего.

С целью оценки влияния нанодобавки «Мультигрейд фуллерен» на свойства вяжущего и показателей качества холодного асфальтобетона было приготовлено вяжущее по аналогичной технологии, но без этапа введения нанодобавки в керосин. Контрольная смесь на таком вяжущем приготавливалась по рецепту 1 (далее контрольный рецепт).

Адгезионные свойства полученного жидкого битумно-полимерного вяжущего с минеральными материалами (гранит, шлак, асфальтогранулят) оценивались по методу Rolling Bottle Test в соответствии с DIN EN 12697-11-2020.<sup>2</sup> Методология проведения испытаний заключалась в визуальной оценке адгезионных свойств вяжущего к минеральным материалам после вращения проб в бутылках с дистиллированной водой со скоростью 40–60 об/мин через 6, 24, 48 и 72 часа.

Для изучения структуры жидкого битумно-полимерного вяжущего с нанодобавкой применялась сканирующая электронная микроскопия (SEM).

Содержание органического вяжущего в исследуемых холодных асфальтобетонных смесях определялось опытным путем из условия обеспеченности соответствия слеживаемости смеси и показателей физико-механических и эксплуатационных свойств холодного асфальтобетона. Процентное содержание оптимального количества вяжущего для каждого рецепта холодной асфальтобетонной смеси представлено в таблице 4.

Таблица

**Процентное содержание оптимального количества  
вяжущего в холодной асфальтобетонной смеси по каждому рецепту**

| Количество вяжущего в смеси сверх 100 минеральной части, % |          |          |          |
|------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|
| Рецепт 1                                                   | Рецепт 2 | Рецепт 3 | Рецепт 4 |
| 4,5                                                        | 3,8      | 4,0      | 3,8      |

Составлено автором

Слеживаемость холодной асфальтобетонной смеси определялась в соответствии с ГОСТ 12801-98<sup>3</sup> (раздел 25) при температуре 20 и минус 5°С.

В качестве стандартных показателей свойств холодных асфальтобетонов в соответствии с ГОСТ Р 70648-2023 определялось содержание воздушных пустот (%), пустоты в минеральном заполнителе (%), пустоты, наполненные битумным вяжущим (%), водостойкость и предел прочности при непрямом растяжении (МПа) на 1 и 28 сутки.

С целью исследования качества холодных асфальтобетонов при эксплуатации были проведены испытания на устойчивость к колееобразованию методом прокатывания нагруженного колеса по одному и тому же следу при температуре 60°С по ГОСТ Р 58406.3-2020<sup>4</sup> и воздействию шипованных шин автомобиля по методу Prall по ГОСТ Р 58406.5-2020.<sup>5</sup>

<sup>2</sup> DIN EN 12697-11-2020 Bituminous mixtures — Test methods — Part 11: Determination of the affinity between aggregate and bitumen.

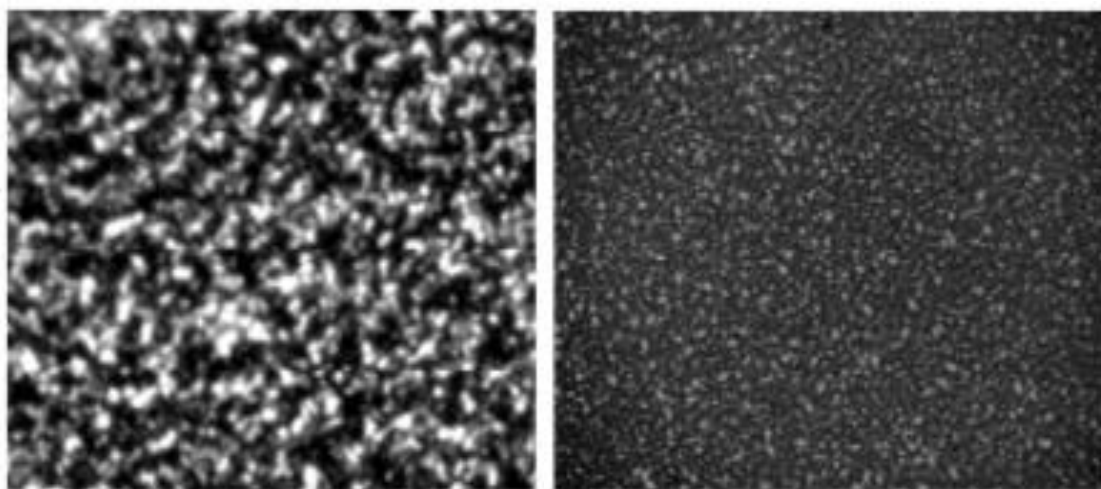
<sup>3</sup> ГОСТ Р 12801-98 Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний.

<sup>4</sup> ГОСТ Р 58406.3-2020 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения стойкости к колееобразованию прокатыванием нагруженного колеса.

<sup>5</sup> ГОСТ Р 58406.5-2020 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения истираемости.

### Результаты исследования

Исследования на сканирующем электронном микроскопе ZEISS CrossBeam 340 подтвердили, что введение нанодобавки «Мультигрейд фуллерен» через стадию ультразвукового диспергирования в керосине приводит к качественному преобразованию структуры вяжущего. Фуллерены, проникая между клубками полимерных цепей СБС [11–13], эффективно ослабляют межмолекулярные связи и препятствуют сворачиванию макромолекул в плотные глобулы (рис. 1). Благодаря выраженному взаимодействию между бензольными кольцами стирольных блоков полимера и сопряжённой системой связей фуллерена, нанодобавка выполняет роль молекулярного диспергатора. Это обеспечивает переход полимера в устойчивое высокодисперсное состояние и способствует его быстрому растворению в керосине с образованием подвижного гомогенного геля. В результате в системе отсутствуют агломераты, что снижает внутренние напряжения и гарантирует равномерное распределение полимера в битумной матрице при последующем смешивании [14; 15].



Слева — контрольный образец SBS в битумной матрице; справа — нанокompозитная система с добавкой «Мультигрейд фуллерен»

**Рисунок 1.** Микроморфология битумно-полимерного вяжущего (SEM,  $\times 1000$ ) (фото авторов)

Процесс объединения гелеобразного раствора СБС, модифицированного фуллеренами, с дорожным битумом БНД 70/100 протекает как многостадийная высокодисперсная диффузия. Благодаря предварительному растворению полимера в керосине, вязкость системы снижается, что облегчает проникновение макромолекул СБС в межпакетное пространство асфальтенов битумной матрицы. За счёт взаимодействия между ароматическими ядрами асфальтенов битума и фуллеренами, связанными с СБС, формируются устойчивые нанокompозитные узлы [16–19]. Это обеспечивает создание единой пространственной структурной сетки по всему объёму вяжущего [20–22].

Результаты испытаний адгезионных свойств вяжущего с минеральными материалами (гранит, шлак, асфальтогранулят) по методу представлены на рисунке 2.

Анализ данных рисунка 2 показал, что в первые 6 часов испытаний адгезионных свойств вяжущего с нанодобавкой «Мультигрейд фуллерен» наблюдается 100 % сохранение сплошности пленки, что обеспечивает возможность применения холодных асфальтобетонных смесей в условиях повышенной влажности.

Даже на трудном для сцепления гранитном щебне степень покрытия через 72 часа вращения составила 87 % с вяжущим, содержащим нанодобавку, что в 2,8 раза выше, чем на аналогичном материале, но с вяжущим без добавок (30 %).

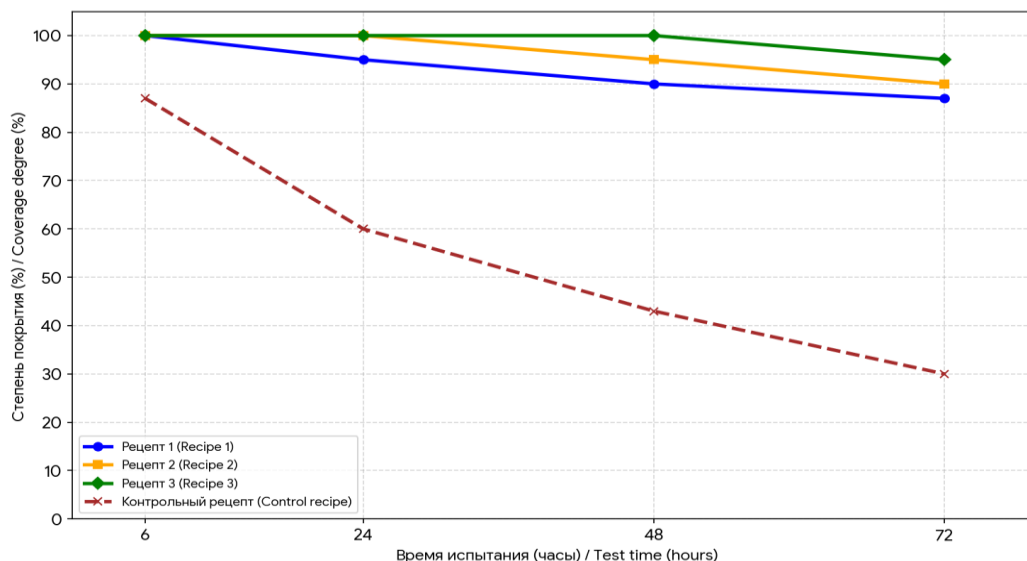


**Рисунок 2.** Адгезионные свойства вяжущего методом *Rolling Bottle Test* в зависимости от типа минерального материала (составлено автором)

Наилучшие показатели сцепления вяжущего зафиксированы на шлаковом материале (95 % сохранности пленки) и фрезерованном асфальтовом ломе (90 % сохранности пленки). Это объясняется высокой пористостью конверторного шлака (улучшенная механическая адгезия) и химическим сродством нового вяжущего к «старому» битуму на поверхности асфальтового лома.

Результаты испытаний исследуемых холодных асфальтобетонных смесей на слеживаемость при положительной и отрицательной температуре представлены на рисунке 3.

Анализ результатов испытаний на слеживаемость по ГОСТ Р 70648-2023 показал, что все разработанные составы (рецепт 1–4) позволяют получить холодные асфальтобетонные смеси с высокой стабильностью к слеживанию и могут быть пригодны для длительного хранения и укладки в неблагоприятных температурных условиях.

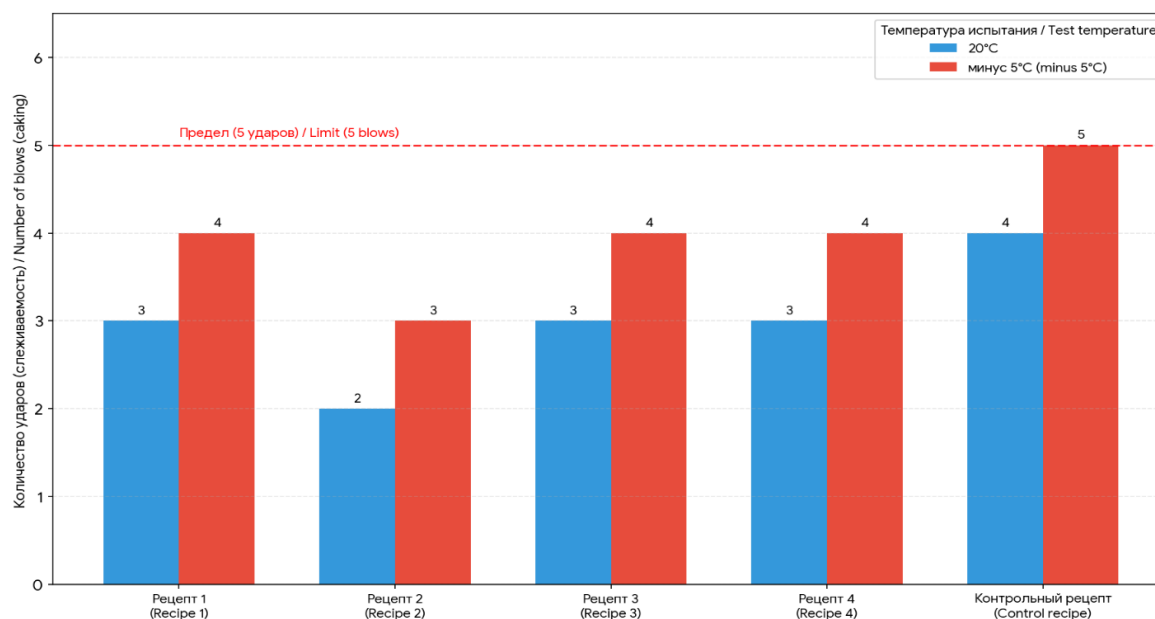


**Рисунок 3.** Слеживаемость исследуемых холодных асфальтобетонных смесей при различных температурах (составлено автором)

Введение нанодобавки в состав на гранитном материале (рецепт 1) позволило снизить показатель слеживаемости более, чем на 20 % по сравнению с контрольным составом, что обусловлено снижением поверхностного натяжения на границе «вяжущее-материал» и равномерным распределением вяжущего тонким слоем с образованием более упругой и стабильной пленки.

Результаты испытаний холодных асфальтобетонов АХ16 по основным физико-механическим показателям представлены в таблице 5.

Применение жидкого битумно-полимерного вяжущего с нанодобавкой «Мультигрейд фуллерен» позволило существенно повысить водостойкость исследуемых холодных асфальтобетонов по сравнению с контрольным составом. Это обусловлено процессом формирования прочных адгезионных связей, устойчивых к агрессивному воздействию влаги и циклам замораживания-оттаивания, что способствует предотвращению преждевременного выкрашивания и разрушения ремонтного слоя.

Таблица 5

**Физико-механические показатели исследуемых холодных асфальтобетонов**

| Наименование показателя                                                   | Требования<br>ГОСТ Р 70648-2023<br>к АХ16 марки М1 | Рецепт<br>1 | Рецепт<br>2 | Рецепт<br>3 | Рецепт<br>4 | Контрольный<br>рецепт |
|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------------------|
| Содержание воздушных<br>пустот, %                                         | 4,0–9,0                                            | 5,7         | 6,2         | 6,5         | 6,3         | 6,8                   |
| Пустоты в минеральном<br>заполнителе, %, не менее                         | 14                                                 | 17,4        | 17,9        | 20,9        | 18,7        | 18,8                  |
| Пустоты, наполненные<br>битумным вяжущим, %                               | 45–80                                              | 67,2        | 65,4        | 68,9        | 66,3        | 63,8                  |
| Предел прочности при непрямом<br>растяжении на 1 сутки, МПа, не<br>менее  | 0,15                                               | 0,21        | 0,18        | 0,26        | 0,23        | 0,15                  |
| Предел прочности при непрямом<br>растяжении на 28 суток, МПа, не<br>менее |                                                    | 0,46        | 0,44        | 0,62        | 0,52        | 0,32                  |
| Водостойкость, не менее                                                   | 0,75                                               | 0,82        | 0,80        | 0,88        | 0,85        | 0,77                  |

*Составлено автором*

Характер кривых на графике (рис. 4) указывает на непрерывное формирование структуры холодного асфальтобетона в течение месяца. Это превращает его из «временного» ремонтного материала в полноценное долговечное покрытие.

Результаты испытаний холодных асфальтобетонов АХ16 на устойчивость к колееобразованию представлены на рисунке 5, а на устойчивость к воздействию шипованных шин автомобиля на рисунке 6.

Анализ динамики колееобразования (рис. 5) подтверждает прямую корреляцию с данными предела прочности при непрямом растяжении (рис. 4).

Составы с наиболее развитой структурной сеткой (Рецепты 3 и 4) демонстрируют минимальную склонность к пластическим деформациям.

Применение конверторного шлака в сочетании с жидким битумно-полимерным вяжущим с нанодобавкой «Мультигрейд фуллерен» обеспечивает снижение итоговой глубины колеи [23; 24].

Это косвенно доказывает, что разработанные холодные асфальтобетонные смеси могут обладать высокой эксплуатационной надежностью при повышенных летних температурах.

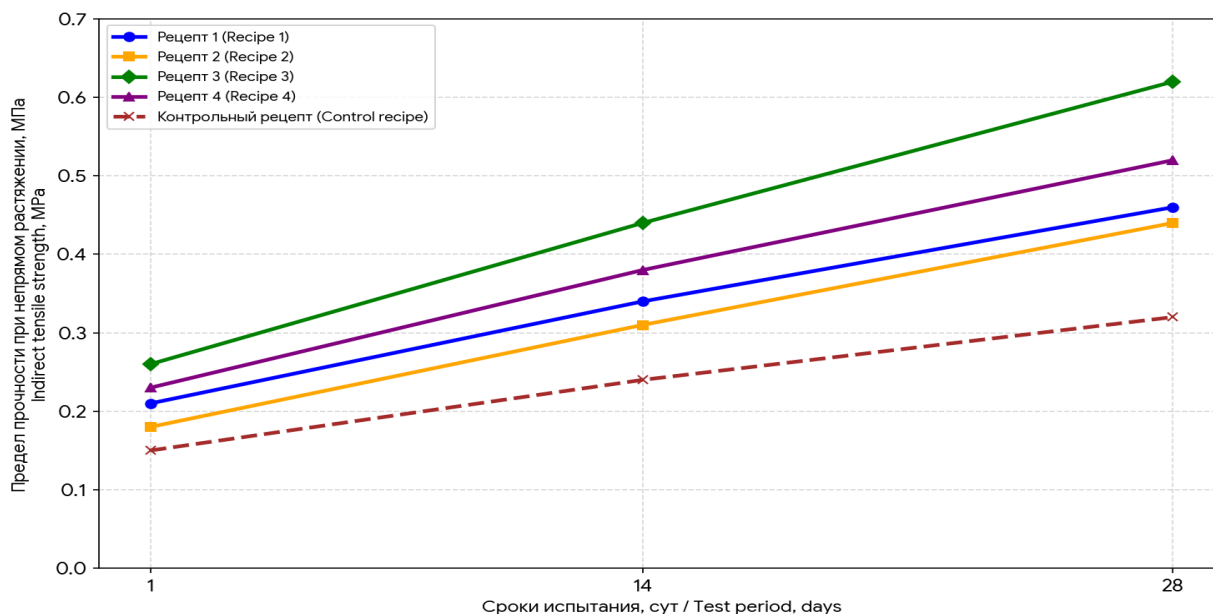


**Рисунок 4.** Динамика изменения предела прочности при непрямом растяжении холодных асфальтобетонов AX16 (составлено автором)

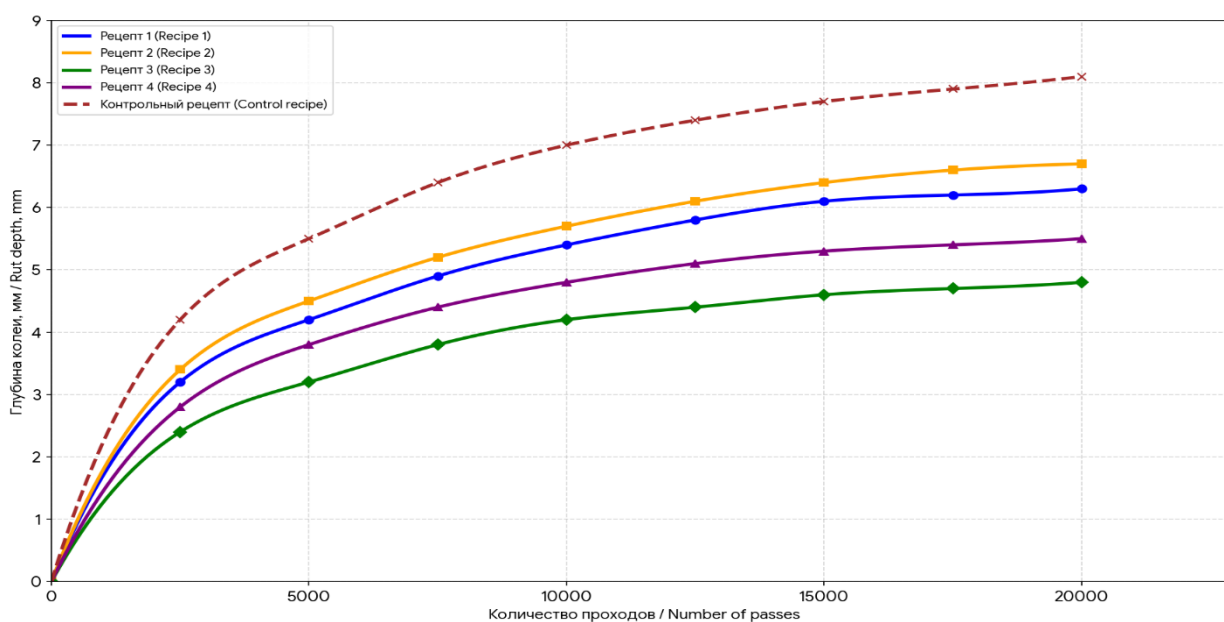


**Рисунок 5.** Результаты испытаний холодных асфальтобетонов AX16 на устойчивость к колеобразованию при температуре 60°C (составлено автором)

Результаты испытаний холодных асфальтобетонов на устойчивость к воздействию шипованных шин по методу Prall подтверждают определяющее влияние природы минерального заполнителя и состава органического вяжущего.

При применении шлаковых материалов удалось достичь минимального показателя истираемости в 25,0 см<sup>3</sup>, что на 30,5 % ниже показателя контрольного состава на гранитном материале, но без нанодобавки в составе жидкого битумно-полимерного вяжущего.

Такое превосходство обусловлено развитой микрошероховатостью и основной природой шлака, которые в сочетании с наноструктурированным битумом создают максимально прочную систему связей устойчивую к выкрашиванию при абразивном воздействию.

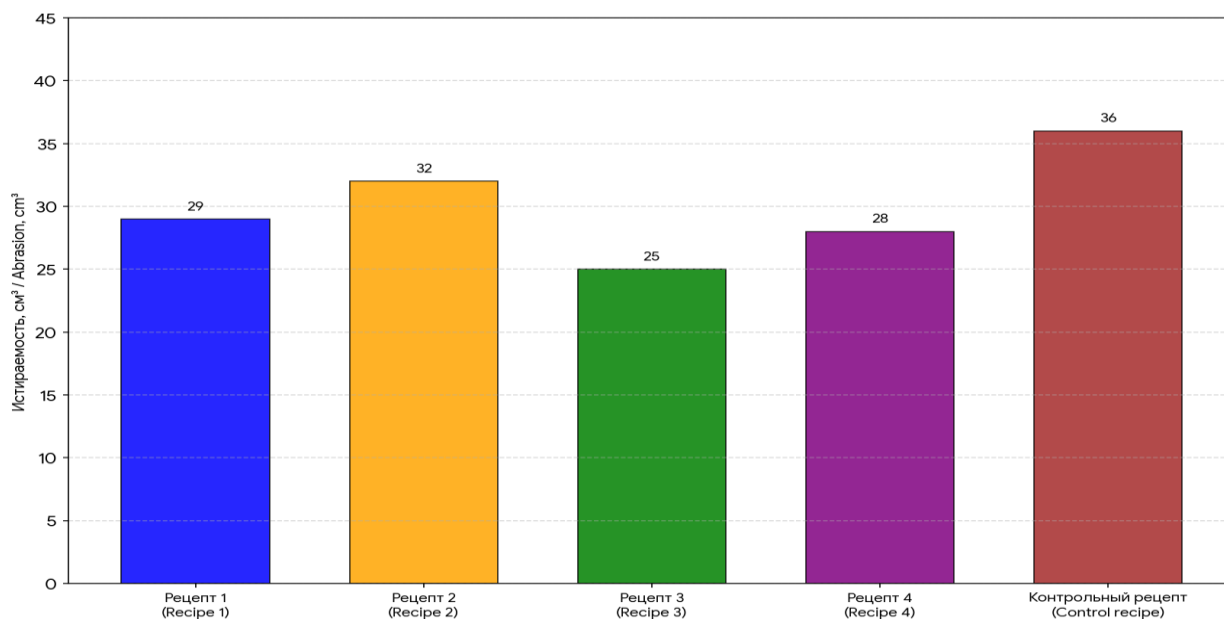


**Рисунок 6.** Испытание холодных асфальтобетонных смесей AX16 на устойчивость к воздействию шин по методу Prall (составлено автором)

### Обсуждение

Проведенные комплексные исследования составов холодных асфальтобетонных смесей, в том числе с использованием вторичных материалов, на жидком битумно-полимерном вяжущем с наноструктурирующей добавкой «Мультигрейд фуллерен» подтвердили их высокую эксплуатационную эффективность. Установлено, что введение нанодобавки через стадию ультразвукового диспергирования обеспечивает качественную перестройку структуры битумно-полимерного вяжущего: фуллерены выступают в роли молекулярного диспергатора, способствуя равномерному распределению полимера СБС и формированию устойчивой пространственной сетки. Это подтверждается результатами испытаний по методу Rolling Bottle Test, где разработанные составы сохранили от 87 % до 95 % площади покрытия пленкой вяжущего после 72 часов агрессивного водного воздействия, что в 2,8 раза превышает показатели контрольного образца. Экспериментально доказано, что смеси на основе конверторного шлака (Рецепт 3) и фрезерованного асфальтового лома характеризуются стабильным набором прочности при непрямом растяжении в течение 28 суток, достигая значений до 0,62 МПа, что существенно выше требований ГОСТ Р 70648-2023. Высокая сопротивляемость колееобразованию при температуре 60°C (глубина колеи 4,8 мм против 8,1 мм у контрольного рецепта) и снижение показателя истираемости по методу Prall обосновывают долговечность ремонтного слоя в реальных условиях эксплуатации. При этом все рецепты сохраняют нормативную слеживаемость и высокую удобоукладываемость как при положительных, так и при отрицательных (минус 5°C) температурах.

Таким образом, разработанные составы холодных асфальтобетонных смесей являются технически и экономически обоснованным решением для всесезонного ремонта дорожных покрытий и могут быть альтернативой литым асфальтобетонным смесям для применения на улично-дорожной сети городов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Tiraturyan A.N. Modelling of stress-strain state of asphalt concrete layers in pavements taking into account the results of laboratory four-point bending tests / A.N. Tiraturyan // Construction Materials and Products. — 2024. — Т. 7, № 4. — DOI: [10.58224/2618-7183-2024-7-4-5](https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-4-5). — EDN: [TFCTGO](https://edn.ru/TFCTGO). (дата обращения: 24.05.2026).
2. Uglova E.V. Frequency Response of Layered Media under Different Conditions of Interlayer Adhesion by the Example of Road Pavement / E.V. Uglova, A.N. Tiraturyan // Journal of Friction and Wear. — 2024. — Т. 45, № 5. — С. 287–293. — DOI: [10.3103/S1068366624700430](https://doi.org/10.3103/S1068366624700430). — EDN: [FIUWBG](https://edn.ru/FIUWBG). (дата обращения: 24.05.2026).
3. Timokhovets V.D. Determination of the amount of wear of the road surface / V.D. Timokhovets // Construction and Geotechnics. — 2024. — Т. 15, № 1. — С. 33–45. — DOI: [10.15593/2224-9826/2024.1.03](https://doi.org/10.15593/2224-9826/2024.1.03). — EDN: [BUSFVR](https://edn.ru/BUSFVR). (дата обращения: 24.05.2026).
4. Alsheyab M.A. A critical review of fatigue cracking in asphalt concrete pavement: A challenge to pavement durability / M.A. Alsheyab, M.A. Khasawneh, A. Abualia, A. Sawalha // Innovative Infrastructure Solutions. — 2024. — Т. 9. — С. 386. — DOI: [10.1007/s41062-024-01704-1](https://doi.org/10.1007/s41062-024-01704-1). — EDN: [ULTNFZ](https://edn.ru/ULTNFZ). (дата обращения: 24.05.2026).
5. Ragab M. Performance Assessment of Cold Asphalt Concrete Mixtures Containing Recycled Paving Materials / M. Ragab, I. Abo El-Naga // Arab J Sci Eng. — 2022. — Т. 47. — С. 4351–4360. — DOI: [10.1007/s13369-021-06101-9](https://doi.org/10.1007/s13369-021-06101-9). — EDN: [YCGXEU](https://edn.ru/YCGXEU). (дата обращения: 24.05.2026).
6. Dulaimi A.F. High performance cold asphalt concrete mixture for binder course using alkali-activated binary blended cementitious filler / A.F. Dulaimi, H. Al Nageim, F. Ruddock, L. Seton // Construction and Building Materials. — 2017. — Т. 141. — С. 160–170. — DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2017.02.155](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.155). (дата обращения: 24.05.2026).
7. Al Nageim H. A Novel Cold Asphalt Concrete Mixture For Heavily Trafficked Binder Course / H. Al Nageim // Zenodo. — 2015. — DOI: [10.5281/ZENODO.1107592](https://doi.org/10.5281/ZENODO.1107592). (дата обращения: 24.05.2026).
8. Saad Sarsam Assessing the Moisture and Aging Susceptibility of Cold Mix Asphalt Concrete / Saad Sarsam, Zahraa Ahmed // Journal of Engineering. — 2021. — Т. 27, № 2. — С. 59–72. — DOI: [10.31026/j.eng.2021.02.05](https://doi.org/10.31026/j.eng.2021.02.05). — EDN: [FISWZL](https://edn.ru/FISWZL). (дата обращения: 24.05.2026).
9. Castillo D. Influence of aggregate morphology on the mechanical performance of asphalt mixtures / D. Castillo, S. Caro, M. Darabi, E. Masad // Road Mater. Pavement Des. — 2018. — Т. 19. — С. 972–991. — DOI: [10.1080/14680629.2017.1283357](https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1283357). (дата обращения: 24.05.2026).
10. Mugume R.B. Contribution of reactive aggregates towards the performance of in-service asphalt pavements / R.B. Mugume, S. Musumba // Int. J. Pavement Res. Technol. — 2021. — Т. 14. — С. 530–536. — DOI: [10.1007/s42947-020-0109-x](https://doi.org/10.1007/s42947-020-0109-x). — EDN: [UXGLVA](https://edn.ru/UXGLVA). (дата обращения: 24.05.2026).
11. Zeng Q. Research on the synergistic modification effect and the interface mechanism of GO/SBS compound-modified asphalt based on experiments and molecular simulations / Q. Zeng, Y. Liu, Q. Liu, Z. Xu // Scientific Reports. — 2023. — Т. 13. — Art. 3496. — DOI: [10.1038/s41598-023-30593-0](https://doi.org/10.1038/s41598-023-30593-0). — EDN: [RYWBOH](https://edn.ru/RYWBOH). (дата обращения: 24.05.2026).

12. Li W. Study on Pavement Performance of Recycled Asphalt Mixture Modified by Carbon Nanotubes and Waste Engine Oil / W. Li, H. Yao, D. Yang [et al.] // Applied Sciences. — 2023. — Т. 13, № 18. — Art. 10287. — DOI: [10.3390/app131810287](https://doi.org/10.3390/app131810287). — EDN: [IOGKWU](https://edn.sci.org/10.3390/app131810287). (дата обращения: 24.05.2026).
13. Riaz A. Experimental study of performance enhancement in SBS modified asphalt binders and mixtures / A. Riaz, I.U. Khan, G. Badin [et al.] // Discover Civil Engineering. — 2025. — Т. 2. — С. 167. — DOI: [10.1007/s44290-025-00319-4](https://doi.org/10.1007/s44290-025-00319-4). — EDN: [ZGOFWB](https://edn.sci.org/10.1007/s44290-025-00319-4). (дата обращения: 24.05.2026).
14. Shafabakhsh G.A. Engineering the effect of nanomaterials on bitumen and asphalt mixture properties. A review / G.A. Shafabakhsh, M. Sadeghnejad, S. Alizadeh // The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. — 2023. — Т. 18, № 2. — С. 1–31. — DOI: [10.7250/bjrbe.2023-18.596](https://doi.org/10.7250/bjrbe.2023-18.596). — EDN: [OZRFFF](https://edn.sci.org/10.7250/bjrbe.2023-18.596). (дата обращения: 24.05.2026).
15. Li Z. Carbon Nanomaterials for Enhancing the Thermal, Physical and Rheological Properties of Asphalt Binders / Z. Li, X. Yu, Y. Liang, S. Wu // Materials. — 2021. — Т. 14, № 10. — Art. 2585. — DOI: [10.3390/ma14102585](https://doi.org/10.3390/ma14102585). — EDN: [OTPSUV](https://edn.sci.org/10.3390/ma14102585). (дата обращения: 24.05.2026).
16. Drabczyk A. Review of Geopolymer Nanocomposites: Novel Materials for Sustainable Development / A. Drabczyk, S. Kudlacik-Kramarczyk, K. Korniejenko [et al.] // Materials. — 2023. — Т. 16, № 9. — Art. 3478. — DOI: [10.3390/ma16093478](https://doi.org/10.3390/ma16093478). — EDN: [XREXOU](https://edn.sci.org/10.3390/ma16093478). (дата обращения: 24.05.2026).
17. Liu J. Nanoparticle dispersion and aggregation in polymer nanocomposites: Insights from molecular dynamics simulation / J. Liu, Y. Gao, D. Cao [et al.] // Langmuir. — 2011. — Т. 27, № 12. — С. 7922–7933. — DOI: [10.1021/la201073m](https://doi.org/10.1021/la201073m). (дата обращения: 24.05.2026).
18. Gong Y. Investigation on Preparation and Properties of Crack Sealants Based on CNTs/SBS Composite-Modified Asphalt / Y. Gong, Y. Pang, F. He, H. Bi // Materials. — 2021. — Т. 14, № 16. — Art. 4569. — DOI: [10.3390/ma14164569](https://doi.org/10.3390/ma14164569). — EDN: [LSHSXE](https://edn.sci.org/10.3390/ma14164569). (дата обращения: 24.05.2026).
19. Caputo P. Bitumen and asphalt concrete modified by nanometer-sized particles: Basic concepts, the state of the art and future perspectives of the nanoscale approach / P. Caputo, M. Porto, R. Angelico [et al.] // Advances in Colloid and Interface Science. — 2020. — Т. 285. — Art. 102283. — DOI: [10.1016/j.cis.2020.102283](https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102283). — EDN: [OIHUAN](https://edn.sci.org/10.1016/j.cis.2020.102283). (дата обращения: 24.05.2026).
20. Araby S. Advancements of carbon nanomaterials-modified asphalt: Processes, properties, economic feasibility and future perspectives / S. Araby, A. Abdulhamid, U. Bakhbergen [et al.] // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). — 2025. — Т. 12, № 4. — С. 965–1010. — DOI: [10.1016/j.jtte.2024.10.002](https://doi.org/10.1016/j.jtte.2024.10.002). — EDN: [COYYPY](https://edn.sci.org/10.1016/j.jtte.2024.10.002). (дата обращения: 24.05.2026).
21. Eisa M.S. Mechanical properties of asphalt concrete modified with carbon nanotubes (CNTs) / M.S. Eisa, A. Mohamady, M.E. Basiouny [et al.] // Case Studies in Construction Materials. — 2022. — Т. 16. — Art. e00930. — DOI: [10.1016/j.cscm.2022.e00930](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00930). — EDN: [EAWUNB](https://edn.sci.org/10.1016/j.cscm.2022.e00930). (дата обращения: 24.05.2026).
22. Ezzat E.N. Effect of Multiple-Walled Carbon Nanotubes (MWCNTs) on Asphalt Binder Rheological Properties and Performance / E.N. Ezzat, I.F. Al-Saadi, A.F. Jasim // Advances in Civil Engineering. — 2023. — С. 3248035. — DOI: [10.1155/2023/3248035](https://doi.org/10.1155/2023/3248035). — EDN: [VASC RG](https://edn.sci.org/10.1155/2023/3248035). (дата обращения: 24.05.2026).

23. Tsibarius Yu.A. Resistance of Asphalt Concrete to Plastic Rutting Depending on Shear Resistance of Binders / Yu.A. Tsibarius, A.L. Lanis, A.N. Berdyugin, M.A. Razuvaev // World of Transport and Transportation. — 2024. — Т. 22, № 2. — С. 34–39. — DOI: [10.30932/1992-3252-2024-22-2-4](https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-2-4). — EDN: [BUILED](https://www.edn.ru/BUILED). (дата обращения: 24.05.2026).
24. Zhang Y. Mechanical evaluation of aggregate gradation to characterize load carrying capacity and rutting resistance of asphalt mixtures / Y. Zhang, X. Luo, I. Onifade [et al.] // Constr. Build. Mater. — 2019. — Т. 205. — С. 499–510. — DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2019.01.218](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.218). (дата обращения: 24.05.2026).

**Uglova Evgeniya Vladimirovna**

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

E-mail: [uglova.ev@yandex.ru](mailto:uglova.ev@yandex.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4768-2427>

RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=456806](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=456806)

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57190176042>

**Chernov Sergey Anatolyevich**

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

## **Cold asphalt-concrete mixtures with structuring nano-additive for all-season repair of road surfaces**

**Abstract.** Introduction. The relevance is due to the need to increase the durability of road patching in conditions of frequent temperature changes over 0°C. The purpose of the study is to develop the composition of an all-season cold asphalt concrete mixture using recycled materials and a nanostructuring additive to ensure high operational reliability of urban coatings. The tasks of selecting the mineral part of a mixture with various materials, developing a liquid bitumen polymer binder and evaluating their properties are formulated.

Materials and methods. Granite crushed stone, sand, converter slag and milled asphalt scrap were used as aggregates. The organic binder is liquid bitumen SG 70/130, modified with SBS polymer and «Multigrade fullerene» nano-additive. The research methods included scanning electron microscopy (SEM), the Rolling Bottle Test method for evaluating the adhesive properties of a binder, testing cold asphalt concrete for rutting and abrasion using the Prall method.

The results of the study. It was found that the introduction of nano-additives through ultrasonic dispersion creates a stable spatial grid in the bitumen matrix, increasing the adhesive properties of the liquid bitumen polymer binder by 2,8 times compared with the control sample (film retention up to 95 %). Optimal compositions of cold asphalt concrete mix AH16 have been developed. The permissible caking capacity of a cold asphalt-concrete mixture has been experimentally confirmed. A steady increase in the performance of cold asphalt concrete was noted. It was found that the use of slag materials made it possible to reduce the track depth from 8,1 mm to 4,8 mm and reduce the abrasion index by 30,5 %.

Conclusions. The developed compositions of cold asphalt concrete mixtures are an effective alternative to cast mixtures. The scientific value lies in substantiating the synergistic effect of nanostructured binders and recycled materials. It is recommended to introduce mixtures for the rapid repair of the urban road network, which will ensure the durability of the repair layer and reduce operating costs.

**Keywords:** cold mixes; pit repairs; secondary materials; nano-additives; fullerenes; rounding; abrasion