

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.731.85

Проблемы эффективного применения технологии холодного ресайклинга дорожных одежд

**Е.С. Буданова^{1,*}, В.А. Ярмолинский²,
А.С. Борисов¹, Н.С. Кучинов¹**

Екатерина Сергеевна Буданова

¹Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация,

²Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва,
Российская Федерация

*budanovaes@ystu.ru**

Владимир Аполенарьевич Ярмолинский

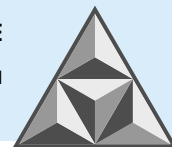
²Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва,
Российская Федерация

1057289@madiasu.onmicrosoft.com

Александр Сергеевич Борисов, Никита Сергеевич Кучинов

¹Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация

Borisovas20011@mail.ru, nikitakuchinov28@gmail.com

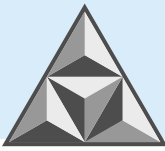


Технология холодного ресайклинга является альтернативой традиционным методам ремонта автомобильных дорог. Изучаются проблемы эффективного применения указанной технологии, связанные с несовершенством регламентирующих стандартов. Важным аспектом эффективности применения холодного ресайклинга является получение однородных и прочных конструктивных слоев дорожной одежды. Физико-механические свойства дисперсных материалов находятся в корреляции с гранулометрическим составом. В органоминеральных смесях большое влияние на агрегатный состав оказывает асфальтовый гранулят, характеризующийся малым содержанием пылеватых фракций. Требования действующих нормативных документов на холодную регенерацию не учитывают данный факт, что приводит к созданию смесей, не оптимальных по составу, и, следовательно, снижению эффективности применяемой технологии. Результаты исследований органоминеральных смесей позволяют оптимизировать их зерновой состав и повысить физико-механические свойства несущих оснований автомобильных дорог.

Ключевые слова: автомобильные дороги, дорожная одежда, холодный ресайклинг, асфальтогранулобетонные и органоминеральные смеси, гранулометрический состав, прочность

Для цитирования:

Буданова Е.С., Яролинский В.А., Борисов А.С., Кучинов Н.С. Проблемы эффективного применения технологии холодного ресайклинга дорожных одежд // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, вып. 1. С. 31-42. URL: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v5n1_2024



SCIENTIFIC ARTICLE

Challenges of effective use of cold-in-place recycling technology of road pavements

E.S. Budanova^{1,*}, V.A. Yarmolinskiy², A.S. Borisov¹, N.S. Kuchinov¹

Ekaterina S. Budanova

¹Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

²Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia

*budanovaes@ystu.ru **

Vladimir A. Yarmolinskiy

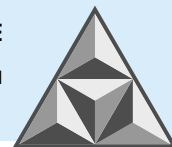
²Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

1057289@madiasu.onmicrosoft.com

Aleksandr S. Borisov, Nikita S. Kuchinov

¹Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

Borisovas20011@mail.ru, nikitakuchinov28@gmail.com

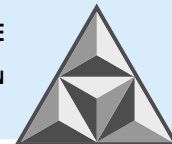


The technology of Cold-in-Place recycling is an alternative to the traditional methods of highway reconditioning. The research problems are the issues of effective application of this technology due to the imperfection of the regulatory standards. An important aspect of the effectiveness of cold recycling is obtaining homogeneous and durable structural layers of road pavement. Physical and mechanical properties of dispersed materials correlate with the particle size distribution. Asphalt granulat with minimum content of dusty fractions has a great influence on the aggregate composition in organomineral mixtures. The requirements of the current normative documents for cold regeneration do not take this fact into account. It causes composing of mixtures with suboptimal composition, and, consequently, a decrease in the efficiency of the applied technology. The results of the conducted researches of organomineral mixtures allow ones' to optimize their grain composition, and to increase physical and mechanical properties of highways' basecourses.

Keywords: highways, pavement, Cold-in-Place recycling, asphalt granular concrete and organomineral mixtures, grain size distribution, strength

For citation:

Budanova E.S., Yarmolinskiy V.A., Borisov A.S. & Kuchinov, N.S. Challenges of effective use of Cold-in-Place recycling technology of road pavements, *Smart Composite in Construction*, 5(1), pp. 31-42 [online]. Available at: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v5n1_2024



ВВЕДЕНИЕ

Автомобильные дороги играют важнейшую роль в экономическом развитии регионов страны. Себестоимость грузо- и пассажироперевозок напрямую зависит от состояния путей сообщения. Темпы строительства новых участков автомобильных дорог несопоставимы с уровнем автомобилизации населения, что способствует формированию на дорогах тяжелых условий эксплуатации. Существующая автодорожная сеть РФ представлена автомобильными дорогами федерального, регионального, муниципального и местного значения, имеющими преимущественно асфальтобетонное покрытие. Качественное состояние дорог, удовлетворяющих требованиям нормативных документов, не превышает 50%. В отдельных регионах, характеризующихся сезонным переувлажнением, показатель качества автомобильных дорог падает до 30% [1].

В настоящее время в РФ реализуется федеральная программа «Безопасные качественные автомобильные дороги», направленная на восстановление автомобильных дорог в 84 регионах страны. Реализация подобных программ за счет привлечения дополнительного финансирования является актуальной для существующей сети региональных и межмуниципальных дорог.

При выборе экономичных и эффективных методов ремонта автомобильных дорог положительно зарекомендовала себя технология холодного ресайклинга дорожных одежд [2-5]. Выполнение восстановительных работ за счет вторичной переработки конструктивных слоев дорожных одежд без дополнительного нагрева материала отвечает принципам устойчивого развития и является важным этапом реализации государственной программы «Применение вторичных ресурсов, вторичного сырья из отходов в сфере строительства и жилищно-коммунального хозяйства на 2022-2030 годы» [6].

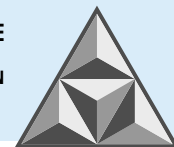
Работы по холодному ресайклингу осуществляют способами «в установке» (ХРУ) и/или «на дороге» (ХРМ). Независимо от выбранных способов, все технологические решения должны быть подчинены общей цели – достижению оптимальных структур получаемых материалов, обеспечивающих их долговечность при минимальных ресурсных затратах. Рациональный подбор состава получаемых материалов особенно важен для условий избыточного увлажнения [1].

В Российской Федерации технологию холодного ресайклинга регламентирует ряд стандартов, основными из которых являются ОДМ 218.6.1.005-2021 «Методические рекомендации по восстановлению асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог методом холодной регенерации» и ГОСТ Р 70197.1(2,3)-2022 «Смеси органоминеральные холодные с использованием вторичного асфальтобетона».

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

При смешении материалов по технологии холодного ресайклинга, в зависимости от состояния конструктивных слоев существующей дорожной одежды, в частности, толщины асфальтобетонного покрытия, возможно получение асфальтогранулобетонной (АГБС) и/или органоминеральной смеси (ОМС). В настоящее время между АГБС и ОМС отсутствуют конкретные различия.

Согласно ОДМ 218.6.1.005-2021, к АГБС относят материал, содержащий асфальтогранулят в количестве $\geq 60\%$ от общей массы, при этом требование распространяется только на изготовление смеси в стационарных установках (ХРУ). Таким образом, количество асфальтогранулята в смеси, полученной методом ХРМ, не регламентируется.



По ГОСТ Р 70197.1-2022, к ОМС относят смеси, содержащие асфальтовый гранулят в количестве $\geq 15\%$ от общей массы, при этом не регламентируется верхний предел по массе.

Помимо количества асфальтового гранулята, АГБС и ОМС имеют незначительные различия в требованиях к агрегатному составу смеси. На рис. 1 представлены области, ограниченные предельными кривыми для зернового состава смесей АГБС и ОМС с номинально максимальным размером фракции 16.0 мм.

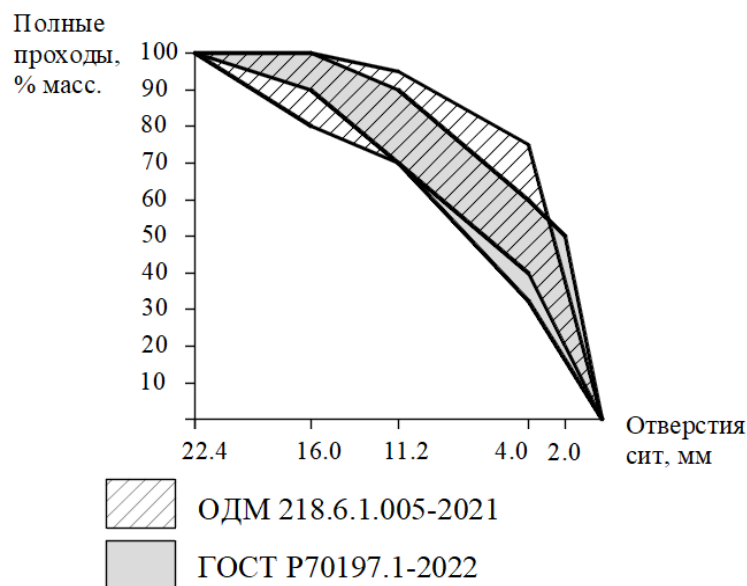


Рис. 1. Области, ограниченные предельными кривыми гранулометрического состава для смесей с номинально максимальным размером заполнителя 16.0 мм в соответствии с нормативными требованиями

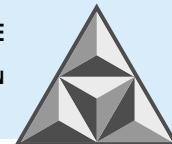
Fig. 1. Areas with the limiting particle size distribution curves for mixtures with a nominally maximum aggregate size of 16.0 mm in accordance with the normative requirements

АГБС и ОМС рассматриваются нами в качестве композиционного материала, в котором заполнителем (грубодисперсной фазой) выступают полизернистые частицы асфальтового гранулята, а дисперсной средой (матрицей) – вяжущее вещество (органическое, минеральное или же комплексное). Особенность АГБС и ОМС – зависимость свойств от структуры, определяемой количеством зерен асфальтового гранулята, их размером, взаимным расположением и характером связей между ними [7].

Рациональное соотношение размеров минерального заполнителя задает тип макроструктуры и обеспечивает необходимую плотность и оптимальные показатели физико-механических свойств материалов дорожных одежд [8-10].

Гранулометрический состав асфальтового гранулята (основного компонента АГБС и ОМС) зависит не только от степени дробления покрытия во время фрезерования, но и от зернового состава исходного асфальтобетонного покрытия. Для выполнения регенерации слоя из ЩМА-15 (по ГОСТ 31015-2002) следует иметь в виду, что исходное содержание зерен размером < 5.0 мм составляет 25–35% и это заведомо не соответствует требуемым значениям (45–75%) для технологии холодного ресайклинга.

Произведен анализ зернового состава асфальтогранулята, полученного путем холодного фрезерования верхнего слоя асфальтобетонного покрытия из ЩМА-15, устроенного в 2013 г. на участке Москва – Ярославль автомобильной дороги М8 «Холмогоры». В табл. 1 представлены требования к зерновому составу АГБС, ОМС и приведены данные фактической гранулометрии слоев фрезерованного асфальтобетонного покрытия и материала верхнего несущего основания.

**Таблица 1.** Агрегатный состав смесей**Table 1.** Aggregate composition of mixtures

Размер ячейки сита, мм	Зерновой состав по стандарту						Фактический зерновой состав материала с дороги	
	АГБС -22		АГБС-16		ОМС-16		Асфальтовый гранулят	Материал основания
	Проходы, %		Проходы, %		Проходы, %		Проходы, %	Проходы, %
22.4	80	100	100	100	100	100	85	91
16.0	70	95	80	100	90	100	66	81
11.2	-	-	70	95	70	90	39	73
4.0	40	75	40	75	35	60	9	52
2.0	0	0	0	0	20	50	0	36

Анализ данных табл. 1 подтверждает полное несоответствие фактического агрегатного состава асфальтового гранулята таковым, требуемым для холодного ресайклинга.

В нормативных документах на холодный ресайклинг корректировка агрегатного состава учитывается, «если зерновой состав асфальтогранулята содержит менее 30% зерен крупнее 4.0 мм, исходя из минимального допустимого количества (не менее 30% по массе в смеси)».

Во фрезерованном асфальтобетонном грануляте с участка автодороги Москва – Ярославль количество зерен минеральной части размером < 4.0 мм находится в пределах 10% при требуемых значениях 40–75%. Следовательно, выполнение холодного ресайклинга на толщину пакета асфальтобетонных слоев без дополнительной корректировки мелкодисперсной фракцией (< 4.0 мм) не отвечает принципу подбора рационального агрегатного состава смеси, что впоследствии приводит к формированию неоптимальной структуры материала.

Помимо разрушения асфальтобетонных слоев, значительные качественные изменения претерпевают слои неукрепленного несущего основания, сопровождаемые процессами дробления и накопления мелкозема [11].

В табл. 1 также представлен фракционный состав пробы слоя несущего основания с участка Москва – Ярославль автомобильной дороги М8 «Холмогоры». По данным гранулометрии, смесь близка к щебеночно-песчаной; при этом следует учесть, что слой был выполнен из щебня, уложенного по способу заклинки. Проба материала основания, взятая по истечении 15–20 лет эксплуатации, содержит большое количество мелких пылеватых частиц.

Для получения составов АГБС, близких к оптимальным, требуется дополнительное введение минерального материала размером < 4.0 мм.

Варьирование гранулометрического состава смесей АГБС методом ХРМ без добавления нового минерального материала можно производить с захватом слоев несущего основания.

Для лабораторного моделирования условий холодного ресайклинга методом ХРМ нами изготовлены три партии образцов с гранулометрическим составом, представленным на рис. 2.

Характерные особенности партий образцов:

- партия 1 – образцы для холодного ресайклинга методом ХРМ на глубину пакета асфальтобетонных слоев;
- партия 2 – образцы получены с захватом части неукрепленного несущего основания;
- партия 3 – образцы с минимальной толщиной асфальтобетонного слоя или при полном его разрушении.

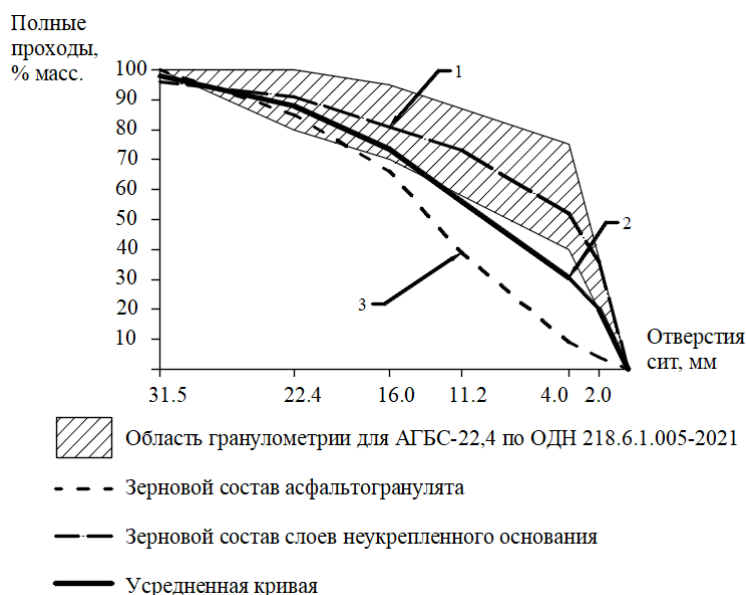
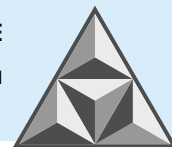


Рис. 2. Кривые зерновых составов слоев дорожной одежды

Fig. 2. Grain composition curves of pavement layers

В качестве исходных материалов применяли:

– фрезерованный асфальтобетон ЩМА-15 с участка Москва – Ярославль автомобильной дороги М8 «Холмогоры»;

– материал основания с участка Москва – Ярославль автомобильной дороги М8 «Холмогоры»;

– портландцемент М500.

Компонентный состав образцов представлен в табл. 2.

Таблица 2. Компонентный состав образцов в соответствующей экспериментальной партии

Table 2. Component composition of experimental batches samples

Партия	Кривая (график рис. 2)	Асфальтогранулят, % масс.	Материал основания с дороги	Портландцемент М500, %, сверх массы
1	3	100	0	3
2	1	0	100	3
3	2	50	50	3

После достижения изготовленными образцами проектного возраста 7 сут. их испытывали на предел прочности при непрямом растяжении на раскол и температуре 20°C.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные образцы диаметром 101.6 мм и высотой (63.5±2.5) мм, изготовленные с применением уплотнителя Маршалла в соответствии с требованиями ОДМ 218.6.1.005-2021, представлены на рис. 3.

Для первой партии образцов характерна крупнозернистая пористая макроструктура. При этом отмечается малая начальная прочность образцов, обусловленная механизмом твердения цементов, а также наблюдается отсутствие адгезии между конгломератами асфальтового гранулята.

С введением мелкодисперсной фракции в образцах третьей партии, а также при изготовлении слоев основания образцов второй партии формируется плотная мелкозернистая песчаная структура.

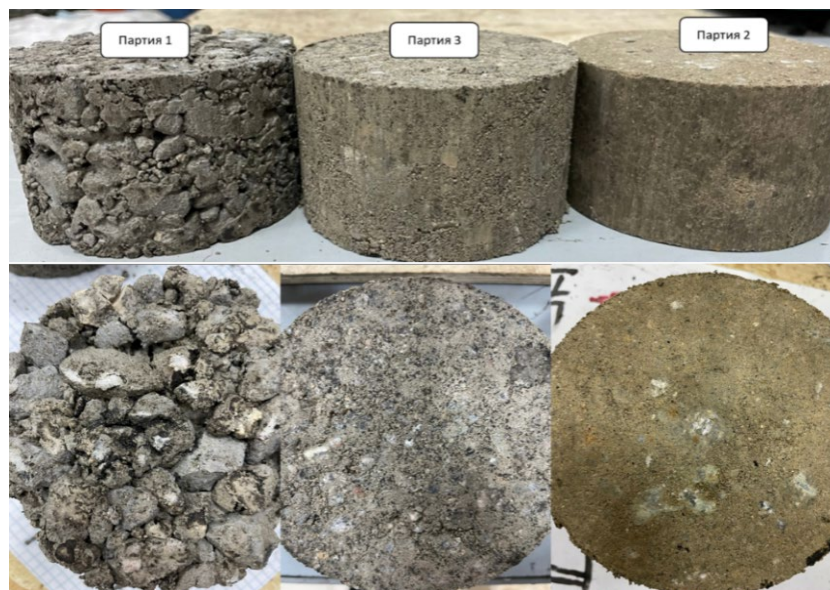
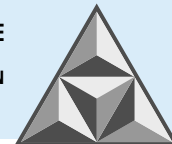


Рис. 3. Образцы экспериментальных партий

Fig. 3. Samples of experimental batches

При использовании в составе органоминеральных смесей портландцемента в качестве связующего вещества зафиксировано существенное снижение пластичности образцов. Роль асфальтогранулята в данном случае нивелируется. Вид образцов из третьей партии после испытания на непрямоe растяжение при расколе представлен на рис. 4.

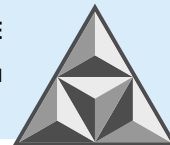


Рис. 4. Образец из третьей партии после испытания

Fig. 4. Sample of the third batch after the test

При анализе полученных экспериментальных данных (см. табл. 3) обнаружена прямая зависимость прочности материалов АГБС и ОМС на основе портландцемента от отношения толщины асфальтобетонного покрытия и глубины захвата слоев основания.

Наличие битумных пленок на зернах асфальтового гранулята, на наш взгляд, препятствует прочному сцеплению цементного камня с поверхностью минерального заполнителя, что объясняет снижение прочности образцов из первой партии. С другой стороны, выявлено, что с введением мелких фракций, имеющих поверхность, свободную от битумных пленок, возрастает прочность образцов из третьей партии.

**Таблица 3.** Результаты экспериментальных исследований прочности образцов**Table 3.** Experimental results of samples strength testing

Партия	Номер образца в партии	Прочность при непрямом растяжении на раскол S , МПа		Минимально требуемая прочность для материалов на основе минерального вяжущего, МПа	
				ОДМ 218.6.1.005-2021	ГОСТ Р 70197.1-2022
1	1-1	0.18	0.20	0.25	0.30
	1-2	0.21			
	1-3	0.21			
2	2-1	0.68	0.64		
	2-2	0.65			
	2-3	0.58			
3	3-1	0.41	0.39		
	3-2	0.31			
	3-3	0.44			

Образцы из второй партии имеют лучшие показатели по гранулометрическому составу, а отсутствие асфальтового гранулята при применении портландцемента в качестве вяжущего положительно сказывается на формировании прочных связей между матрицей и наполнителем, о чем свидетельствуют высокие прочностные характеристики материала.

ВЫВОДЫ

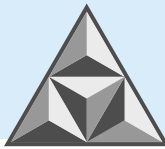
В нормативных документах отсутствуют четкие рекомендации по применению органических и/или неорганических вяжущих в составе материалов, применяемых в технологии холодного ресайклинга дорожных одежд.

Требования к гранулометрическому составу регенерированных материалов не могут быть реализованы при производстве работ методом ХРМ. Регулирование гранулометрического состава получаемых органоминеральных смесей можно осуществлять с захватом слоев неукрепленного несущего основания.

При выполнении холодного ресайклинга дорожных одежд на глубину пакета асфальтобетонных слоев выявлена неэффективность применения портландцемента в качестве вяжущего вещества. Снижение доли асфальтогранулята до 50% в ресайклированном слое обеспечивает возрастание прочности материала на 30%.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Буданова Е.С., Ярмолинский В.А.** Холодный ресайклинг. Повышение эффективности использования на территории РФ // *Умные композиты в строительстве*. 2022. Т. 3, № 2. С. 54-67. URL: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N2_2022. DOI: 10.52957/27821919_2022_2_54
- Аджиева А.А., Чекалина Л.А., Храпова Т.Е.** Приоритетное использование технологии холодного ресайклинга для восстановления дорожной одежды // *Новые технологии в учебном процессе и производстве: мат. XX Междунар. науч.-техн. конф., посв. 165-летию со дня рожд. основоположника космонавтики, создателя теории межпланетных сообщений К.Э. Циолковского*. Рязань, 2022. С. 75-77.
- Баранов И.А., Дерли О.А.** Отечественные и зарубежные инновационные технологии в дорожном строительстве // *Безопасный и комфортный город: сб. науч. тр. по мат. V междунар. науч.-практ. конф. (Орел, 06-08 июня 2022 года)*. Орел: Орловский гос. ун-т им. И.С. Тургенева, 2022. С. 146-149.
- Ленивцев А.Г., Дуданов И.В.** Повышение качества восстановления дорожного покрытия // *Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии: сб. статей 79-й Всерос. науч.-техн. конф. (Самара, 18-22 апреля 2022 г.)*. Самара: Самарский гос. техн. ун-т, 2022. С. 926-929.



5. **Никишин В.Е.** Опыт применения ресурсосберегающей технологии холодного ресайклинга // *Техническое регулирование в транспортном строительстве*. 2020. № 1 (40). С. 15-18.
6. **Баруздин А.А., Закревская Л.В.** Перспективы рециклинга в строительстве с целью создания инновационных композиционных материалов // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4, вып. 3. С. 29-54. URL: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3_2023
7. **Аль-Карагули М.М.** Устройство дорожных покрытий и оснований с применением холодной регенерации асфальтобетона в установке: дис. ...канд. техн. наук. Москва, 2021. 179 с.
8. **Сузев Н.А., Ширинов А.К.** Влияние зернового состава на эксплуатационные свойства асфальтобетона // *Научные труды ЮКГУ им. М. Ауэзова*. 2019. № 4 (52). С. 32-37.
9. **Траутвайн А.И.** Анализ влияния качественного состава асфальтобетонной смеси на основные показатели характеристик асфальтобетона в покрытии // *Строительные материалы и изделия*. 2019. Т. 2, №1. С. 17-23.
10. **Яконцева О.В., Щепетева Л.С.** Влияние зернового состава асфальтобетона на показатели физико- механических свойств // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. 2020. № 3. С. 71-76. DOI 10.15593/24111678/2020.03.09.
11. **Кудрявцев А.Н.** Учет структурных разрушений неукрепленного каменного материала оснований при проектировании дорожных одежд: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2021. 213 с.

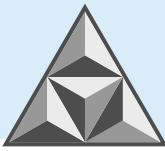
Поступила в редакцию 15.01.2024

Одобрена после рецензирования 21.02.2024

Принята к опубликованию 12.03.2024

REFERENCES

1. **Budanova, E.S. & Yarmolinskiy, V.A.** (2022) Cold recycling. Improving the efficiency of use in the territory of the Russian Federation, *Smart Composite in Construction*, 3(2), pp. 54-67 [online]. Available at: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N2_2022. DOI: 10.52957/27821919_2022_2_54 (in Russian).
2. **Adzhieva, A.A., Chekalina, L.A. & Khrapova, T.E.** (2022) Priority use of cold recycling technology for pavement rehabilitation, *Novye tekhnologii v uchebnoy protsesse i proizvodstve: mat. XX Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., posv. 165-letiyu so dnya rozhd. osnovopolozhnika kosmonavtiki, sozdatelya teorii mezhpplanetnykh soobshcheniy K.E. Tsiolkovskogo*. Ryazan, pp. 75-77 (in Russian).
3. **Baranov, I.A. & Derli, O.A.** (2022) Domestic and foreign innovative technologies in road construction, *Bezopasniy i komfortniy gorod: sb. nauch. tr. po mat. V mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Orel, 06-08 iyunya 2022 goda)*. Orel: Orlovskiy gos. un-t im. I.S. Turgeneva, pp. 146-149 (in Russian).
4. **Lenivtsev, A.G. & Dudanov, I.V.** (2022) Improving the quality of road pavement rehabilitation, *Tradicii i innovacii v stroitel'stve i arkhitekture. Stroitel'stvo i stroitel'nye tekhnologii: sb. statey 79-j Vseros. nauch.-tekhn.konf. (Samara, 18-22 aprelya 2022 g.)*. Samara: Samarskiy gos. tekhn. un-t, pp. 926-929 (in Russian).
5. **Baruzdin, A.A. & Zakrevskaya, L.V.** (2023) Prospects of recycling in construction to produce innovative composite materials, *Smart Composite in Construction*, 4(3), pp. 29-54 [online]. Available at: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3_2023 (in Russian).
6. **Nikishin, V.E.** (2020) Experience in application of resource-saving technology of cold recycling, *Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve*, (1), pp. 15-18 (in Russian).
7. **Al-Karaguli, M.M.** (2021) *Construction of road pavements and bases using cold regeneration of asphalt concrete in the plant*. PhD. Moscow (in Russian).
8. **Suzev, N.A. & Shirinov, A.K.** (2019) Influence of grain composition on the operational properties of asphalt concrete, *Nauchnye trudy YUKGU im. M. Auezova*, (4), pp. 32-37 (in Russian).
9. **Trautvain, A.I.** Analysis of the influence of the qualitative composition of asphalt concrete mixture on the basic indicators of asphalt concrete characteristics in the pavement, *Stroitel'nye materialy i izdeliya*, 2(1), pp. 17-23 (in Russian).



10. **Yakontseva, O.V. & Shchepeteva, L.S.** (2020) Influence of asphalt concrete grain composition on physical and mechanical properties, *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*, (3), pp. 71-76. DOI: 10.15593/24111678/2020.03.09 (in Russian).
11. **Kudryavtsev, A.N.** (2021) *Consideration of Structural Fractures of Unreinforced Stone Base Material in Design of Road Pavements*. PhD. Moscow (in Russian).

Received 15.01.2024

Approved after reviewing 21.02.2024

Accepted 12.03.2024