

Научная статья
УДК 625.7/8
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-522-539>
EDN: PFVRNU



ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ ДЛЯ УКРЕПЛЕНИЯ АСФАЛЬТОГРАНУЛЯТА

А.А. Лыткин, Г.В. Долгих, А.С. Пролягин ✉

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия

✉ ответственный автор
aleksandrprolygin@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Использование при ремонте дорог с дорожными одеждами нежесткого типа, технологии холодной регенерации с укреплением асфальтогранулята, различными вяжущими, позволяет значительно увеличить межремонтные сроки, снизить материалоемкость дорожных конструкций и эксплуатационные затраты.

При этом замена цемента для укрепления асфальтогранулята на комплексные медленноотвердевающие минеральные вяжущие с повышенным содержанием двухкальциевого силиката (белита) даст возможность сэкономить значительные объемы цемента, повысить технологические параметры асфальтогранулобетонных смесей и долговечность дорожных конструкций за счет длительного сохранения в асфальтогранулобетоне большого резерва негидротированного вяжущего.

Следовательно, разработка научно обоснованных оптимальных составов комплексных минеральных вяжущих для укрепления асфальтогранулята является весьма актуальной научной и практической задачей.

Материалы и методы. Лабораторные исследования включали определение физических и физико-механических свойств исходных материалов для получения асфальтогранулобетона: нефелинового шлама, портландцемента, асфальтогранулята по стандартным методикам ОДМ 218.3.043–2015, ГОСТ 31108–2020, ОДМ 218.6.1.005–2021 соответственно.

Также было выполнено определение тонкости помола, сроков начала схватывания и прочности на сжатие в возрасте 56 сут, разработанных минеральных вяжущих, по ГОСТ Р 70196–2022.

Изготовление и испытание образцов асфальтогранулобетона выполнялось согласно требованиям ОДМ 218.6.1.005–2021. Помимо нормативных сроков испытания образцов в возрасте 7 и 28 сут, были произведены испытания в возрасте 270 сут.

Результаты. Дано теоретическое обоснование применения нефелинового шлама в качестве компонента комплексных минеральных вяжущих для укрепления асфальтогранулята. Разработаны оптимальные составы комплексных минеральных вяжущих класса 5,0 из нефелинового шлама, активированного 5–15% портландцемента. Рекомендованы оптимальные дозировки комплексных вяжущих 5–15% для укрепления асфальтогранулята при строительстве оснований и покрытий.

Использование данных вяжущих позволит получать высокотехнологичные асфальтогранулобетонные смеси и асфальтогранулобетон повышенной долговечности при минимальном расходе цемента, что способствует увеличению межремонтных сроков и улучшению экологической обстановки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: монолитные основания, асфальтогранулят, комплексные минеральные вяжущие, холодный ресайклинг, белитовый шлам

Статья поступила в редакцию 29.12.2025; одобрена после рецензирования 17.02.2026; принята к публикации 15.06.2026.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

© Лыткин А.А., Долгих Г.В., Пролягин А.С., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Лыткин А.А., Долгих Г.В., Пролыгин А.С. Эффективность использования комплексных минеральных вяжущих для укрепления асфальтогранулята // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 3. С. 522-539. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-522-539>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-522-539>

EDN: PFVRNU

THE EFFECTIVENESS OF USING COMPLEX MINERAL BINDERS TO STRENGTHEN ASPHALT GRANULATE

Alexandr A. Lytkin, Gennadiy V. Dolgikh, Aleksandr S. Prolygin ✉

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),

Omsk, Russia

✉ corresponding author
aleksandrprolygin@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The use of cold regeneration technology with stabilization of asphalt granulate by various binders in the repair of roads with nonrigid pavement allows to increase the time between repairs considerably, to reduce the material consumption for road structures, and operating costs.

At the same time, the replacement of cement used to strengthen asphalt granulate with complex slow-hardening mineral binders with an increased content of dicalcium silicate (belite) will save significant volume of cement, improve the technological parameters of asphalt granulate concrete mixtures and enhance the durability of road structures due to the long-term preservation of a large reserve of non-hydrated binder in asphalt granulate concrete. Therefore, the development of scientifically based optimal compositions of complex mineral binders for strengthening asphalt granulate is a highly relevant scientific and practical task.

Materials and methods. Laboratory studies included the determination of the physical and physical-mechanical properties of the initial material used to produce asphalt granulated concrete: nepheline sludge, Portland cement, and asphalt granulate, according to standard methods described in industry road methodological documents and Interstate standard: ODM 218.3.043-2015, GOST 31108-2020, and ODM 218.6.1.005-2021, respectively.

The measurements of grinding fineness, time of initial setting and compressive strength of the developed mineral binders after 56 days have also been fulfilled.

The manufacture and testing of asphalt granulated concrete samples has been carried out in accordance with the requirements of industry road methodological document: ODM 218.6.1.005-2021. In addition to the standard checking periods for samples aged 7 and 28 days, tests have been performed at the age of 270 days.

Results. A theoretical justification is given for the use of nepheline sludge as a component of complex mineral binders to strengthen asphalt granulate. Optimal compositions of complex mineral binders to 5.0 class from nepheline sludge, 5-15% activated Portland cement have been developed. Optimal dosages of 5-15% of complex binders have been recommended for strengthening asphalt granulate during the construction of foundations and coatings. The use of these binders will enable to obtain high-tech asphalt granule concrete mixtures and asphalt granule concrete with increased service life and minimal cement consumption, which will help to extend the time between repairs and improve the environmental conditions.

KEYWORDS: monolithic basements, asphalt granulate, complex mineral binders, cold recycling, belite sludge

The article was submitted: December 29, 2025; approved after reviewing: February 17, 2026; accepted for publication: June 15, 2026.

All the authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Lytkin A.A., Dolgikh G.V., Prolygin A.S. The effectiveness of using complex mineral binders to strengthen asphalt granulate. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (3): 522-539. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-522-539>

© Lytkin Alexandr A., Dolgikh Gennadiy V., Prolygin Aleksandr S., 2026



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Качество дорог исторически считается одной из важнейших проблем нашей страны. Несмотря на наблюдающуюся в последние годы положительную динамику в России, согласно открытым источникам, более 50% автомобильных дорог общего пользования регионального и местного значения не отвечают нормативным требованиям. В результате потери РФ из-за низкого качества сети автомобильных дорог составляют 3% валового внутреннего продукта.

С целью удовлетворения потребностей социально-экономического развития страны была разработана государственная программа «Развитие транспортной системы» и транспортная стратегия РФ на период до 2030 года¹.

Только за 5 лет (2025–2030 гг.) в рамках национального проекта «Инфраструктура для жизни» планируется привести в нормативное состояние более 14 тыс. км автомобильных дорог опорной сети России².

Одним из основных условий успешного развития дорожной отрасли и повышения потребительских свойств автомобильных дорог является более широкое внедрение в производство инновационных технологий и материалов.

Стратегия развития инновационной деятельности в области дорожного хозяйства определяет, в частности, следующие приоритетные направления:

- увеличение межремонтных сроков автомобильных дорог;
- исследования в области неорганических материалов и обоснованный рациональный выбор вяжущих для дорожного строительства с целью повышения эффективности укрепления грунтов и каменных материалов, т.к. отдельные действующие методы и методики

ки не отражают потребностей отрасли и требуют актуализации;

- применение технологии холодного ресайклинга при капитальном ремонте автомобильных дорог и получение исходных данных для актуализации и разработки нормативных документов, регламентирующих применение технологии холодного ресайклинга;

- реализация Программы стандартизации в части дорожного хозяйства и т. д.³

В настоящее время более 96% дорог нашей страны с дорожными одеждами нежесткого типа и основаниями из зернистых материалов (ЩПС, ЩГПС, ГПС, ПГС, песка, щебня и т. д.).

Одним из существенных недостатков таких дорожных конструкций являются значительные затраты на эксплуатацию, связанные в том числе с сокращением межремонтных периодов и общих сроков службы. Постоянно возрастающая интенсивность движения на автомобильных дорогах общего пользования, а также значительное повышение нагрузок на ось требуют увеличения несущей способности дорожных одежд при их ремонте путём устройства монолитных оснований [1].

При этом важно обеспечить достижение указанной цели без значительного повышения материалоемкости дорожных конструкций.

Наиболее эффективной технологией восстановления слоев оснований и усиления нежестких дорожных одежд в сравнении с традиционными методами является «Метод холодной регенерации» (ресайклинг)^{4, 5, 6} [2, 3]. Об этом свидетельствует и положительный международный опыт применения данной технологии. Например, исследование специалистов из Германии показало, что слои из асфальтогранулобетона обладают повышенной деформативностью и усталостной прочностью [4].

¹ Постановление Правительства РФ от 20.12.2017 № 1596 (ред. от 16.01.2023) «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие транспортной системы» (с изменениями и дополнениями) // <https://www.consultant.ru> (дата обращения: 21.11.2025).

² Национальный проект «Инфраструктура для жизни» : [сайт]. Инфраструктура для жизни; 2026 [процитировано 17 февраля 2026]. Доступно: <https://dorogistrany.ru/MassMedia>. (17.02.2026)

³ Распоряжение Федерального дорожного агентства от 03.03.2021 № 771-р «Об утверждении стратегии развития инновационной деятельности в области дорожного хозяйства на период 2021–2025 годов» // <https://www.consultant.ru> (дата обращения: 21.10.2025).

⁴ ARRA. Guidelines for cold-in-place recycling. Asphalt Recycling and Reclaiming Association. Annapolis, USA, 2001, 176 p.

⁵ Milton L.J., Earland M. Design guide and specification for structural maintenance of highway pavements by cold in-situ recycling. TRL report 386, Transport Research Laboratory, 1999, 79 p.

⁶ Перспектива развития ремонта дорожных одежд нежесткого типа методом холодной регенерации / Г.С. Бахрах // 70 лет отраслевой дорожной науке: сб. науч. тр., 1996. 77–86 с.

Данная технология предусматривает выполнение регенерации старых слоев покрытия и основания с максимальным использованием материала старого асфальтобетона как основного компонента нового монолитного основания. При условии укрепления полученного асфальтогранулята вяжущими (цементом, битумом, битумной эмульсией и др.) достигается значительная экономия кондиционных дорожно-строительных материалов и в 1,5–2 раза повышается общий модуль упругости дорожной одежды.

Кроме того, в результате ресайклинга материала старого покрытия исключается вероятность появления отраженных трещин в выше лежащих слоях покрытия.

Но следует отметить, что метод укрепления гранулята цементом не лишен недостатков. Во-первых, цемент – дорогостоящий материал. Во-вторых, вследствие того, что цемент является высокоактивным быстротвердеющим вяжущим, технологические операции по устройству конструктивных слоев с его применением должны выполняться в сжатые сроки, а следовательно, с ограничением длины технологической захватки⁷.

Кроме того, значительное повышение прочности асфальтогранулобетона (АГБ) с использованием цемента приводит к увеличению жесткости материала и, как следствие, снижению трещиностойкости монолитных слоев оснований.

Следовательно, метод холодной регенерации требует дальнейшего развития в части использования для укрепления асфальтогранулята других более эффективных вяжущих.

Замена портландцемента медленноотвердевающими бесклнкерными вяжущими, не имеющими ярко выраженного срока схватывания: сланцевые золы уноса, активированные известью; тонкомолотые фосфорные шлаки, активированные известью или цементной пылью; белитовые шламы – позволит облегчить соблюдение требуемых технологических параметров при производстве работ в ранние

сроки твердения материала. Свежеуложенный слой дорожной одежды из смеси на основе медленноотвердеющего вяжущего будет обладать повышенной ремонтпригодностью в процессе укладки и уплотнения⁸ [5].

В 2018 г. в результате совместных исследований ООО «Стройсервис» и ФГБОУ ВО «СибАДИ» была установлена принципиальная возможность и целесообразность использования тонкомолотого нефелинового шлама АО «РУСАЛ Ачинск» в качестве вяжущего для укрепления асфальтогранулята по технологии холодный ресайклинг, в том числе при низких, до 0 °С, температурах воздуха без введения специальных противоморозных добавок [2].

Для снижения дозировки вяжущего при укреплении асфальтогранулята и повышения экономической эффективности использования шлама, при значительном удалении объектов от шламоотвала (г. Ачинск), целесообразно активировать шлам цементом, известью, минеральным порошком, цементной пылью, гипсом, золой сухого отбора и т. п.⁹ [6].

Следует отметить, что вопросы по разработке научно обоснованных оптимальных составов комплексных вяжущих на основе нефелинового шлама и укреплению ими асфальтогранулята в настоящее время не изучены.

Цель исследований – научное обоснование и разработка оптимальных составов комплексных минеральных вяжущих на основе нефелинового шлама для укрепления асфальтогранулята.

Поставленная цель соответствует приоритетным направлениям стратегии развития инновационной деятельности в области дорожного хозяйства РФ¹⁰.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие научные и практические задачи:

1. На основании анализа результатов многолетних исследований в области использования минеральных вяжущих для устройства монолитных оснований дать теоретиче-

⁷ ОДМ 218.6.1.005–2021 Методические рекомендации по восстановлению асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог методом холодной регенерации (с Изменением)

⁸ Лыткин А.А. Применение белитового шлама для устройства слоев дорожных одежд при отрицательных температурах: автореф. дис. канд. техн. наук: 05. 23. 11 / А. А. Лыткин. 1990. 18 с.

⁹ Применение нефелинового шлама для строительства автомобильных дорог в условиях Сибири: автореф. дис. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук: 05. 23. 14. / В. М. Бескровный. М. 1984. 22 с.

¹⁰ Распоряжение Федерального дорожного агентства от 03.03.2021 № 771-р «Об утверждении стратегии развития инновационной деятельности в области дорожного хозяйства на период 2021–2025 годов»// <https://www.consultant.ru> (дата обращения: 21.10.2025).

ское обоснование применения нефелинового шлама в качестве компонента комплексных минеральных вяжущих для укрепления асфальтогранулята.

2. Разработать оптимальные составы двухкомпонентных минеральных вяжущих из нефелинового шлама, активированного различными дозировками портландцемента.

3. Изучить кинетику твердения асфальтогранулобетона, укрепленного разработанными комплексными минеральными вяжущими.

Анализ нормативных и литературных источников по вопросу устройства монолитных оснований с применением комплексных минеральных вяжущих при капитальном ремонте дорог

В соответствии с ГОСТ Р 71404–2024¹¹ за-проектированные дорожные одежды должны быть не только прочными и надежными в эксплуатации, но и экономичными и наименее материалоемкими, особенно по расходу дорогостоящих строительных материалов и энергоресурсов [7]. В частности, можно отметить положительный опыт индийских исследователей, которые с целью экономии энергоресурсов рекомендуют массовое использование отходов промышленного производства [8].

Выбор и назначение материалов для конструктивных слоев дорожных одежд необходимо осуществлять на основе результатов анализа сырьевой базы региона строительства, ее мощностей, вида и объемов вторичных материалов, получаемых от разборки существующих дорожных одежд (при реконструкции, капитальном ремонте, ремонте и содержании автомобильных дорог).

Следовательно, с учетом того, что более 20 регионов РФ не имеют местных каменных материалов, при выборе технологии ремонта дорог с дорожными одеждами нежесткого типа, с целью комплексного решения проблем, предпочтение следует отдавать технологии холодного ресайклинга^{12, 13, 14} [9].

Сегодня отсутствуют нормативные барьеры для повсеместного, массового применения технологии холодного ресайклинга, а вопрос наиболее эффективной реализации данной технологии сводится к выбору ведущей машины (ресайклера) и вяжущего для укрепления слоя асфальтового гранулята. Для получения асфальтогранулобетона можно использовать как традиционные вяжущие (цемент, известь, битум, битумную эмульсию), так и комплексные минеральные вяжущие (введение в состав органоминеральной смеси минерального и органического вяжущих)¹⁴.

Как известно, основным и наиболее широко используемым видом минерального вяжущего в строительной отрасли является портландцемент. Это, вероятно, является одной из главных причин наиболее массового применения цемента для устройства монолитных оснований, в том числе и по технологии холодного ресайклинга. Как отмечалось ранее, использование для этих целей цемента сопряжено с существенными недостатками [2, 6].

Кроме того, цементная промышленность отличается очень высокой энергоемкостью и является одним из крупнейших источников выбросов парниковых газов. Во всем мире ее предприятия выбрасывают около 2,2–2,5 млрд т. CO₂, что составляет примерно 5–7% всех его отходов. Сюда входят выбросы, образующиеся при получении цемента (47%), при сжигании топлива (40%), выхлопы транспортных средств (около 5%) и выбросы, образующиеся при сжигании топлива для выработки электроэнергии, используемой в производстве цемента (около 5%)¹⁵. В частности, исследователи из Италии, Великобритании и Германии принимают активные меры по совершенствованию технологии производства цемента с целью сокращения выбросов в атмосферу. Кроме того, принимаются административные меры по сти-

¹¹ ГОСТ Р 71404–2024 Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования (с Поправкой): дата введения 2024-09-01. М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2024. 147 с.

¹² Бахрах Г.С. Перспектива развития ремонта дорожных одежд нежесткого типа методом холодной регенерации // 70 лет отраслевой дорожной науке: сб. науч. тр., 1996. 77–86 с.

¹³ Постановление Правительства Российской Федерации от 30.05.2017 № 658 «О нормативах финансовых затрат и Правилах расчета размера бюджетных ассигнований федерального бюджета на капитальный ремонт, ремонт и содержание автомобильных дорог Федерального значения» // <https://www.consultant.ru> (дата обращения: 21.10.2025).

¹⁴ ГОСТ Р 70197.1–2022 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси органоминеральные холодные с использованием вторичного асфальтобетона. Общие технические условия (с Поправкой): дата введения 2022-10-01. М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2022. 14 с.

¹⁵ Uliasz-Bocheńczyk A., Mokrzycki E. Emisja dwutlenku węgla w przemyśle cementowym // Polityka energetyczna. 2003. Т. 6. Zeszyt specjalny. S. 367—375.

муляции предприятий отрасли за сокращение выбросов [10, 11].

Стратегия развития промышленности строительных материалов на период до 2030 г. определяет следующие технологические решения обозначенной проблемы:

- производство модифицированных вяжущих с минимальной долей портландцементного клинкера и введением минеральных добавок техногенного происхождения;
- развитие бесклинкерной технологии вяжущих щелочного затворения как на основе использования отходов топливно-энергетической промышленности при их наличии в данном регионе (шлакощелочные цементы), так и с применением тонкодисперсных добавок алюмосиликатной природы (геополимеры)¹⁶ [6].

Перспективность развития бесклинкерной технологии производства строительных композитов доказана современными отечественными и мировыми тенденциями¹⁷ [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18].

В связи с этим все больший интерес проявляется к комплексным бесклинкерным вяжущим, в большей степени на основе сырьевых материалов алюмосиликатного состава.

В 2023 г. утвержден ГОСТ Р 70196–2022, регламентирующий технические условия на комплексные минеральные вяжущие¹⁸.

Комплексное минеральное вяжущее (КМВ) – это строительная смесь, представляющая собой порошкообразный вяжущий материал, обладающий гидравлическими свойствами техногенного происхождения, содержащий портландцементный клинкер и минеральные компоненты¹⁷.

Номенклатура бесклинкерных медленновердеющих вяжущих довольно широка, что связано, прежде всего, с большим разнообразием применяемых сырьевых материалов (зачастую, мало востребованных) как природного, так и техногенного происхождения^{16,17} [12, 13, 14, 15, 16, 19, 20, 21].

Основными компонентами КМВ могут быть портландцемент, доменные и электротермо-

софосфорные гранулированные шлаки, зола-уноса, строительная известь (кальциевая негашеная и гидратная), микрокремнезем, пуццолан, глиеж, обожженный сланец, белитовый шлак, известняк, золошлаковые смеси и пыль-уноса вращающихся печей и т.д.

Преимущества комплексных минеральных вяжущих перед цементом:

- возможность влиять на сроки набора прочности за счёт применения различных компонентов;
- влияние на уровень pH при укреплении грунтов;
- экономичность (за счет замены части цемента другим, менее дорогим, минеральным вяжущим);
- увеличение плотности цементного камня за счёт формирования определённого состава продуктов гидратации, коагулирующих поры;
- создание эффекта расширения, компенсирующего усадку цементного камня в оптимальном диапазоне;
- повышение экологичности материалов, поскольку для вяжущего требуется меньшее количество клинкера, при производстве которого происходят огромные вредные выбросы в атмосферу [16, 22].

Кроме того, одним из основных преимуществ специально приготовленных комплексных вяжущих перед традиционными (цементом и известью), по нашему мнению, является возможность регулировать физико-химические свойства вяжущего путем изменения его минералогического состава, с учетом свойств укрепляемого материала и климатических условий строительства.

В условиях усиливающейся антропогенной нагрузки на окружающую природную среду особое значение приобретает проблема расширения сырьевой базы для дорожного строительства за счет максимального использования отходов и полупродуктов различных производств, что соответствует отраслевой программе «Применение вторичных ресурсов и вторичного сырья из отходов в про-

¹⁶ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 10.05.2016 № 868-р «Об утверждении стратегии развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года» (с изменениями на 23 ноября 2016 года) // <http://www.consultant.ru> (21.10.2025).

¹⁷ Саламанова М.Ш. Строительные композиты на основе бесклинкерных вяжущих щелочной активации: автореф. дис. д-ра техн. наук: 2.1.5. Грозный, 2022. 50 с.

¹⁸ ГОСТ Р 70196–2022. Дороги автомобильные общего пользования. Комплексные минеральные вяжущие для стабилизации и укрепления грунтов. Технические условия: дата введения 2023-01-01. М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2022. 12 с.

мышленном производстве», утвержденной постановлением Правительства Российской Федерации от 17.11.2022 г.¹⁹

Использование вторичных ресурсов помимо экологического эффекта позволяет получить также и значительный экономический эффект за счет экономии невозобновляемых дефицитных природных ресурсов, уменьшения площадей для складирования отходов и расширения сырьевой базы дорожно-строительных материалов.

При выборе отхода для производства комплексных вяжущих с целью значительного снижения дозировки активатора твердения предпочтение следует отдавать отходам, обладающим самостоятельной гидравлической активностью. При этом наибольший эффект отмечается при использовании отходов с повышенным содержанием β -двухкальцевого силиката, белита (C_2S), что дает возможность получать медленнотвердеющие комплексные минеральные вяжущие²⁰ [6].

В соответствии с ГОСТ Р 70196–2022²¹ медленнотвердеющее комплексное минеральное вяжущее (МКМВ) – гидравлическое вяжущее, которое должно соответствовать требованиям, предъявляемым к прочности вяжущего на сжатие в возрасте 56 сут твердения.

Преимущества медленнотвердеющих вяжущих:

- длительное сохранение тиксотропной коагуляционной структуры. Это позволяет увеличить время на укладку смеси, удлинить захватку участка производства работ и улучшить качество уплотнения смеси;
- способность восстанавливать прочность после рыхления и повторного уплотнения;
- высокие прочностные и деформативные свойства. Это объясняется образованием

при медленном твердении гелевидных гидросиликатов кальция, которые после полного уплотнения по прочностным показателям не уступают кристаллогидратным новообразованиям, а по деформативным свойствам даже превосходят, так как имеют волокнистую структуру^{19,22} [1, 2, 6];

- способность к самоупрочнению (самопроизвольное увеличение прочности структурных связей в монолитном материале в процессе его эксплуатации)^{20,23,24}.

Преимущества медленнотвердеющих комплексных вяжущих перед цементом достаточно убедительно показаны в работах под руководством Б.А. Асмагулаева, по изучению свойств самовосстанавливающихся дорожных бетонов на основе белитовых цементов [23].

Установлено, что для обеспечения медленного затвердевания новых цементов в их составах содержание белита было увеличено до 60–85%, а количество быстротвердеющих высокоосновных силикатов: алитов (C_3S), алюминатов (C_3A) и алюмоферритов (C_4AF) снижено до минимума. При этом в процессе гидратации вяжущего возникают аморфные новообразования с длительным сохранением тиксотропной коагуляционной структуры.

Как отмечалось ранее, одним из отходов, представляющих практическую ценность для дорожной отрасли, является белитовый шлам. Этот материал образуется при производстве глинозема – оксида алюминия из нефелиновых и бокситовых руд способом спекания, в процессе высокотемпературного обжига руды с известняком на глиноземных предприятиях. Окись кальция и содержащийся в руде кремнезем вступают в соединение и образуют в основном частично гидратированный β -двухкальцевый силикат. Из продукта спекания путем гидротермального выщелачивания выделяют

¹⁹ Паспорт отраслевой программы «Применение вторичных ресурсов и вторичного сырья из отходов в промышленном производстве» (утв. Правительством РФ 17 ноября 2022 г. № 13493п-П11) // <http://www.consultant.ru> (21.10.2025).

²⁰ Применение нефелинового шлама для строительства автомобильных дорог в условиях Сибири: автореф. дис. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук: 05. 23. 14 / В. М. Бескровный. М. 1984. 22 с.

²¹ ГОСТ Р 70196–2022. Дороги автомобильные общего пользования. Комплексные минеральные вяжущие для стабилизации и укрепления грунтов. Технические условия: дата введения 2023-01-01. М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2022. 12 с.

²² Лыткин А.А. Применение белитового шлама для устройства слоев дорожных одежд при отрицательных температурах : автореф. дис. канд. техн. наук: 05. 23. 11 / А.А. Лыткин. 1990. 18 с.

²³ ОДМ 218.3.043–2015. Методические рекомендации по применению в слоях дорожных одежд натуральных белитовых шламов. Росавтодор Министерства транспорта Российской Федерации. Информавтодор. Издан на основании распоряжения Федерального дорожного агентства от 30.11.2015. № 2283. Р. с., М. 66 с.

²⁴ Белоусов Б.В., Гаврилов А.Н., Афонин А.С. Предложения по конструированию дорожных одежд с повышенным сроком службы. Мир дорог. М., 2016. 2 с.

глинозем, а белит, практически полностью оставаясь в шламе, в виде пескообразного отхода поступает в отвал. В зависимости от перерабатываемой руды белитовый шлак подразделяют на нефелиновый и бокситовый²⁵.

Невостребованные запасы этого отхода на шламоотвалах предприятий алюминиевой промышленности России составляют сотни миллионов тонн. Например, на сегодняшний день только на Ачинском глиноземном комбинате (АО «РУСАЛ Ачинск») общий объем складского хранения нефелинового шлака составляет более 220 млн т при ежегодном поступлении 6–7 млн т в год. При этом использование нефелинового шлака в качестве вторичного материального ресурса не превышает 200–300 тыс. т в год [7].

По фазовому составу нефелиновый шлак состоит в основном из смеси силикатов, гидросиликатов (20–30%) и гидроалюминатов кальция (3–5%), гидроферритов, карбонатов. Содержание C_2S в нефелиновом шлаке составляет 70–85%.

Бокситовый шлак состоит из C_2S (40–55%), кальцита, магнетита, гематита, гидрограната, гиббсита, перовскита, кварцита²⁵.

На основании многолетних научных исследований и производственного внедрения были разработаны методические рекомендации и национальные стандарты, регламентирующие область применения белитового шлака: ОДМ

218.3.043–2015²⁶, ГОСТ Р 70196–2022²⁷, ГОСТ Р 70452–2022²⁸, ГОСТ Р 70455–2022²⁹.

Натуральный белитовый (шлак текущего производства, немолотый) использовался в конструктивных слоях дорожных одежд при строительстве сотен километров дорог общего пользования I–IV категорий и нефтепромысловых дорог в I, II, III и IV дорожно-климатических зонах, в Красноярском крае, Омской, Новосибирской, Тюменской, Томской и Павлодарской областях^{30,31,32} [1, 2].

Кроме того, в 80-десятые годы прошлого столетия В.М. Бескровным разработаны составы специальных вяжущих для укрепления грунтов с применением нефелинового шлака Ачинского глиноземного комбината (гипсошламовые и портландцементношламовые), которые в опытно-экспериментальном порядке были использованы при строительстве монолитных оснований дорожных одежд³³.

Использование нефелинового шлака в качестве сырья для получения комплексных вяжущих, в промышленных объемах является экономически целесообразным решением, так как технология приготовления состоит только из двух операций – сушки шлака и совместного помола его с активатором твердения. Благодаря чему себестоимость таких вяжущих, по аналогии с нефелиновым цементом, может быть ориентировочно в 2 раза ниже себестоимости портландцемента [24].

²⁵ Логинова И.В., Кырчиков А.В. Аппаратурно-технологические схемы в производстве глинозема // Екатеринбург: Урфу, 2011. 233 с.

²⁶ ОДМ 218.3.043–2015. Методические рекомендации по применению в слоях дорожных одежд натуральных белитовых шламов. Росавтодор Министерства транспорта Российской Федерации. Информавтодор. Издан на основании распоряжения Федерального дорожного агентства от 30.11.2015. № 2283. Р. с., М. 66 с.

²⁷ ГОСТ Р 70196–2022. Дороги автомобильные общего пользования. Комплексные минеральные вяжущие для стабилизации и укрепления грунтов. Технические условия: дата введения 2023-01-01. М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2022. 12 с.

²⁸ ГОСТ Р 70452–2022 Дороги автомобильные общего пользования. Грунты стабилизированные и укрепленные неорганическими вяжущими. Общие технические условия: дата введения 2023-01-01. М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2022. 24 с.

²⁹ ГОСТ Р 70455–2022 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси щебеночно-гравийно-песчаные, обработанные неорганическими вяжущими. Общие технические условия: дата введения 2023-01-01. М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2022. 14 с.

³⁰ Лыткин А.А. Применение белитового шлака для устройства слоев дорожных одежд при отрицательных температурах : автореф. дис. канд. техн. наук : 05. 23. 11 / А.А. Лыткин. 1990. 18 с.

³¹ Белоусов Б.В., Гаврилов А.Н., Афонин А.С. Предложения по конструированию дорожных одежд с повышенным сроком службы // Мир дорог. М., 2016. 2 с.

³² Бескровный В.М., Дежина Н.С., Лыткин А.А. Устройство щебеночного основания с обработкой нефелиновым шламом // Сб. «Вопросы производства и применения местных каменных материалов из естественных горных пород и отходов промышленности при строительстве дорожных одежд» Тр. СоюздорНИИ. М., 1981. 62–68 с.

³³ Применение нефелинового шлака для строительства автомобильных дорог в условиях Сибири: автореф. дис. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук: 05. 23. 14. / В. М. Бескровный. М. 1984. 22 с.

Следует также отметить, что в строительном материаловедении научной базой для разработки современных композитов является закон структурного сродства [25].

Сродство структур достигается за счёт согласования следующих параметров: фазовый состав компонентов, химическое сродство, генетическое сродство (общность происхождения материалов). По всем этим параметрам структуры белитового шлама и цемента с большой долей вероятности согласуются, что является убедительной предпосылкой к получению из этих материалов высокоэффективных комплексных минеральных вяжущих.

Следовательно, для производства комплексных минеральных вяжущих для укрепления асфальтогранулята, из условия высокого содержания белита (70–85%), огромных невосребованных объемов и положительного

опыта использования в дорожной отрасли предпочтение следует отдать нефелиновому шламу Ачинского глиноземного комбината.

Тем более что в соответствии с ГОСТ Р 70196–2022 (таблица 2)³⁴ этот шлам входит в перечень основных компонентов КМВ и есть положительный опыт лабораторных исследований и опытно-экспериментального строительства по применению молотого нефелинового шлама для укрепления асфальтового гранулята. Подробно результаты этих исследований изложены в работах [4, 7].

С учетом проведенного анализа литературных источников для выполнения лабораторных исследований были предварительно приняты следующие составы комплексных минеральных вяжущих и их дозировки для укрепления АГБС (таблица 1).

Таблица 1
Составы минерального вяжущего и дозировки в АГБС
Источник: составлено авторами.

Table 1
Compositions of mineral binders and its dosages in asphalt granule concrete mixtures
Source: compiled by the authors.

Маркировка вяжущего	Состав минерального вяжущего	Дозировка вяжущего в составе АГБС, %
А	Комплексное вяжущее (совместный помол 95% шлама +5% цемент)	5
		10
		15
В	Комплексное вяжущее (совместный помол 90% шлама +10% цемент)	5
		10
		15
С	Комплексное вяжущее (совместный помол 85% шлама +15% цемент)	5
		10
		15
Н	Натуральный нефелиновый шлам 100% (контрольный)	5
		10
		15
Ц	Цемент 100% (контрольный)	5

³⁴ ГОСТ Р 70196–2022. Дороги автомобильные общего пользования. Комплексные минеральные вяжущие для стабилизации и укрепления грунтов. Технические условия: дата введения 2023-01-01. М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2022. 12 с.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Лабораторные исследования выполнялись в 3 этапа: испытание исходных материалов для приготовления комплексных минеральных двухкомпонентных вяжущих и асфальтогранулята (АГ) на предмет соответствия их нормативным требованиям; приготовление комплексных вяжущих и определение их физико-механических свойств; изготовление и испытание образцов из асфальтогранулобетонных смесей с различными дозировками комплексных вяжущих.

Для подбора составов асфальтогранулобетона был отобран асфальтогранулят из штабеля на базе строительной организации ЗАО «Стройсервис».

Агрегатный состав АГ определяли ситовым методом по ГОСТ 33029–2014³⁵.

Также было определено содержание битума в АГ, методом выжигания по ГОСТ 58401.15–2019³⁶.

Оптимальную влажность АГ определяли по ГОСТ 25607–2009³⁷.

Согласно данному нормативному документу оптимальная влажность складывается из оптимальной влажности песка (частицы мельче 5 мм), выделенного из асфальтогранулята, и водопоглощения щебня (частицы крупнее 5 мм).

В качестве компонентов комплексных минеральных вяжущих использовали общестро-

ительный портландцемент по ГОСТ 31108–2020³⁸ и натуральный нефелиновый шлам.

Гранулометрический состав натурального нефелинового шлама определяли ситовым методом по ГОСТ 8736–2014³⁹.

Перед определением активности шлама была определена его оптимальная влажность и максимальная плотность по ГОСТ 22733⁴⁰.

После чего, согласно ОДМ 218.3.043–2015,⁴¹ из шлама оптимальной влажности были изготовлены образцы диаметром 50,5 мм и высотой $50,5 \pm 1,0$ мм под нагрузкой 15 МПа, которые хранились в нормальных условиях и испытывались на сжатие в возрасте 90 сут.

Изготовление комплексных минеральных вяжущих, в соответствии с ГОСТ Р 70196–2022,⁴² выполняли методом совместного помола шлама с цементом в лабораторной шаровой мельнице марки МШ-40МЛ.

Материал массой 15 кг загружался в барабан со стальными шарами, после помола в течение 30 мин отбиралась проба 50 г и просеивалась на сите № 008 в соответствии с ГОСТ 310.2–76⁴³.

Помол осуществлялся в течение 120 мин с контролем тонкости помола через каждые 30 мин, до достижения тонкости помола общестроительных цементов.

Физико-механические свойства комплексных вяжущих определяли по стандартной методике ГОСТ Р 70196–2022⁴².

³⁵ ГОСТ 33029–2014 Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и гравий из горных пород. Определение гранулометрического состава (с Поправкой, с Изменением № 1): дата введения 2016-06-01. М.: Стандартинформ, 2019. 12 с.

³⁶ ГОСТ Р 58401.15–2019 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Определение содержания битумного вяжущего методом выжигания: дата введения 2019-06-01. М.: Стандартинформ, 2019. 8 с.

³⁷ ГОСТ 25607–2009 Смеси щебеночно-гравийно-песчаные для покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия (с Поправкой): дата введения 2011-01-01. М.: Стандартинформ, 2018. 14 с.

³⁸ ГОСТ 31108–2020 Цементы общестроительные. Технические условия (с Поправкой, с Изменением № 1): дата введения 2022-02-01. М.: Стандартинформ, 2020. 29 с.

³⁹ ГОСТ 8736–2014 Песок для строительных работ. Технические условия (с Поправками, с Изменением № 1): дата введения 2015-04-01. М.: Стандартинформ, 2019. 12 с.

⁴⁰ ГОСТ 22733–2016 Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности (с Поправками): дата введения 2017-01-01. М.: Стандартинформ, 2019. 15 с.

⁴¹ ОДМ 218.3.043–2015. Методические рекомендации по применению в слоях дорожных одежд натуральных белитовых шламов. Росавтодор Министерства транспорта Российской Федерации. Информавтодор. Издан на основании распоряжения Федерального дорожного агентства от 30.11.2015. № 2283. Р. с., М. 2015. 66 с.

⁴² ГОСТ Р 70196–2022. Дороги автомобильные общего пользования. Комплексные минеральные вяжущие для стабилизации и укрепления грунтов. Технические условия: дата введения 2023-01-01. М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2022. 12 с.

⁴³ ГОСТ 310.2–76 Цементы. Методы определения тонкости помола (с Изменением № 1). М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 5 с.

С целью выявления степени эффективности использования комплексных минеральных вяжущих, кроме составов двухкомпонентных вяжущих «А», «В», «С» с дозировками активатора (цемента) 5, 10 и 15%, для укрепления АГБС использовали натуральный (немолотый) нефелиновый шлам и цемент.

Составы минеральных вяжущих и их дозировки для укрепления АГБС представлены в таблице 1.

Агрегатный состав АГБС определяли по методике ОДМ 218.6.1.005–2021⁴⁴.

Для изучения кинетики твердения АГБ, укрепленного минеральными вяжущими, изготавливались цилиндрические образцы по стандартной методике ОДМ 218.6.1.005–2021⁴⁴ в уплотнителе Маршалла.

Образцы хранили в нормальных условиях в климатической камере при температуре $20 \pm 0,5$ °С и относительной влажности 98–100% и испытывали для определения предела прочности на сжатие и предела прочности при непрямом растяжении, по 3 образца каждой серии в возрасте 7 и 28 сут при температурах 20 и 40 °С.

Кроме нормативных сроков испытаний, с учетом повышенного содержания в шламе бе-

лита (до 85%), дополнительно выполняли испытания образцов в возрасте 270 сут.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Агрегатный состав АГ соответствует требованиям ОДМ 218.6.1.005–2021⁴⁴. Содержание битума в АГ составило 5,0% сверх 100% от минеральной части.

Оптимальная влажность асфальтогранулята составила 4,7% (оптимальная влажность песка в составе АГ 10,2%, водопоглощение щебня 2,6%).

Цемент по физико-механическим свойствам, согласно ГОСТ 31108–2020⁴⁵, классифицируется как ЦЕМ II/B-1 32,5Н.

Нефелиновый шлам по модулю крупности классифицируется как песок средний.

Оптимальная влажность шлама составила 26,2%, а максимальная плотность 1,48 г/см³.

Предел прочности при сжатии образцов из шлама после 90 сут нормального твердения составил 6,5 МПа. Следовательно, в соответствии с ОДМ 218.3.043–2015 (см. таблицу 1)⁴⁴, шлам относится к высокоактивному.

Результаты определения физико-механических свойств комплексных минеральных вяжущих представлены в таблице 2.

Таблица 2
Физико-механические свойства комплексных минеральных вяжущих
Источник: составлено авторами.

Table 2
Physical and mechanical properties of complex mineral binders
Source: compiled by the authors.

Наименование состава	Прочность на сжатие в возрасте 56 сут, МПа	Вещественный состав КВМ, % масс		Тонкость помола по остатку на сите 0,08 мм, % масс		Начало схватывания, мин	
		Нефелиновый шлам	Цемент	Требования ГОСТ Р 70196	Фактическое значение	Требования ГОСТ Р 70196	Фактическое значение
А	5,59	95	5	не более 15,0	14,5	Не ранее 150	>360
В	6,36	90	10		14,6		>360
С	6,42	85	15		14,8		>360

⁴⁴ ОДМ 218.6.1.005–2021 Методические рекомендации по восстановлению асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог методом холодной регенерации (с Изменением) : дата введения 2021-02-17. М.: Росавтодор, 2021. 29 с.

⁴⁵ ГОСТ 31108–2020 Цементы общестроительные. Технические условия (с Поправкой, с Изменением № 1): дата введения 2022-02-01. М.: Стандартинформ, 2020. 29 с.

Таблица 3

Агрегатный состав АГБС

Источник: составлено авторами.

Table 3

Aggregate composition of asphalt granule concrete mixtures

Source: compiled by the authors.

Требования согласно ОДМ для АГБС	Полные проходы, % масс, через сито с отверстием, мм					
	45	31,5	22,4	16,0	11,2	4,0
32	100	100–80	95–70	-	-	75–40
22	-	100	100–80	95–70	-	75–40
16	-	-	-	100–80	95–70	75–40
Фактические значения	100	100	94,6	83,2	72,4	41,3

Согласно ГОСТ Р70196–2022⁴⁶ все приготовленные вяжущие (А, В, С) удовлетворяют требованиям для медленноотвердеющих комплексных минеральных вяжущих (МКМВ), класс по прочности 5,0. Следовательно, тонкомолотый нефелиновый шлам, активированный цементом 5–15%, за счёт развитой реакционноспособной поверхности частиц может быть рекомендован для производства медленноотвердеющих комплексных минеральных вяжущих.

Все исследуемые асфальтогранулобетонные смеси по агрегатному составу соответствуют требованиям для АГБС–22⁴⁷.

Для примера данные по агрегатному составу АГБС с дозировкой комплексного минерального вяжущего 15% представлены в таблице 3.

На рисунке 1 приведены результаты определения водостойкости образцов АГБ.

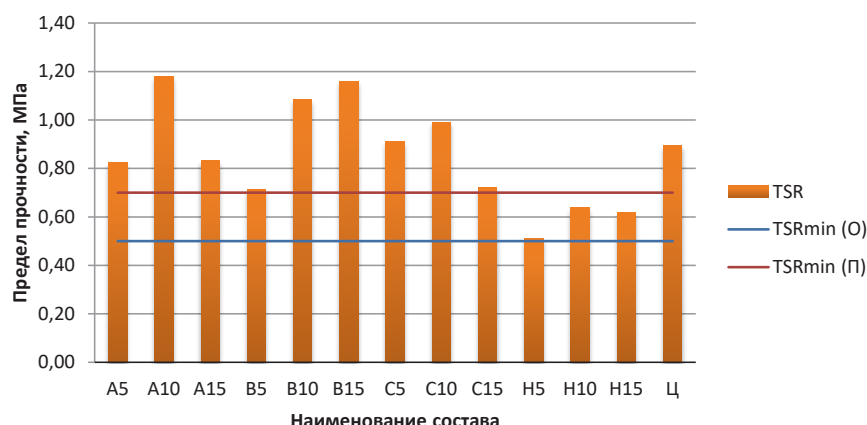


Рисунок 1 – Водостойкость образцов АГБ.

TSR – водостойкость образцов; $TSR_{min}(O)$ и $TSR_{min}(П)$ – требуемая минимальная водостойкость образцов, отформованных из АГБС, применяемой в качестве слоев оснований (и нижних слоев покрытий) и верхних слоев покрытий дорожной одежды.

Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Water Resistance of Asphalt Granule Concrete Samples

TSR – water resistance of samples; $TSR_{min}(O)$ and $TSR_{min}(P)$ – required minimum water resistance of samples formed from asphalt granule concrete mixture used as base layers (and lower pavement layers) and upper pavement layers of road surfaces.

Source: compiled by the authors.

⁴⁶ ГОСТ Р 70196–2022. Дороги автомобильные общего пользования. Комплексные минеральные вяжущие для стабилизации и укрепления грунтов. Технические условия: дата введения 2023-01-01. М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2022. 12 с.

⁴⁷ ОДМ 218.6.1.005–2021 Методические рекомендации по восстановлению асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог методом холодной регенерации (с Изменением): дата введения 2021-02-17. М.: Росавтодор, 2021. 29 с.

Данные по испытанию образцов на водостойкость свидетельствуют о том, что все составы, кроме контрольных «Н5», «Н10», «Н15» удовлетворяют нормативным требованиям для оснований и покрытий дорожных одежд. Причём водостойкость образцов АГБ, укрепленного комплексными вяжущими, в основном выше, чем контрольных образцов укрепленных цементом.

Составы АГБ, укрепленные натуральным шламом по водостойкости, удовлетворяют только требованиям для оснований.

На рисунках 2 и 3 приведены результаты определения предела прочности при непрямом растяжении образцов АГБ при температуре 20 и 40 °С.

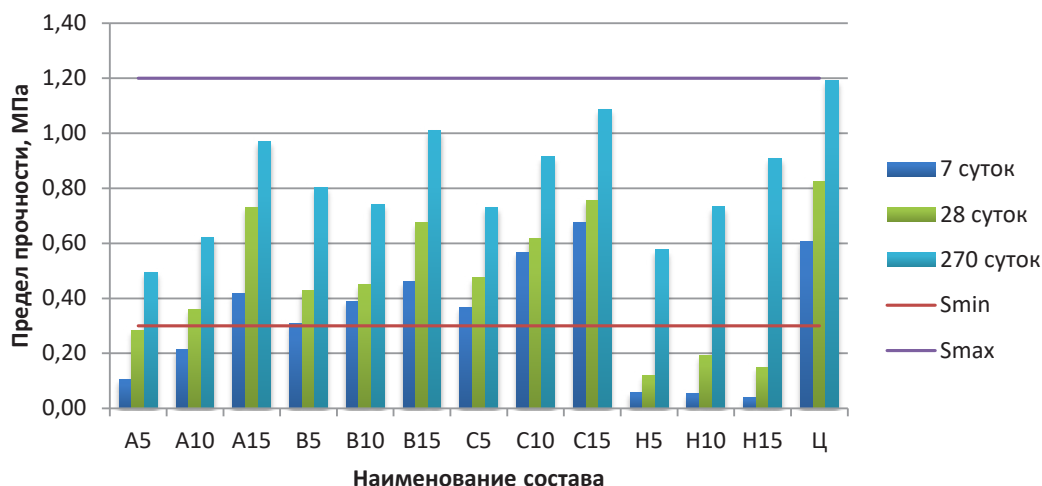


Рисунок 2 – Предел прочности образцов АГБ при непрямом растяжении при температуре 20 °С.
 S_{min} и S_{max} – требуемое минимальное и максимальное значение предела прочности при непрямом растяжении при температуре 20 °С
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Strength limit of asphalt granule concrete samples under indirect tensile stress at 20 °C
 S_{min} and S_{max} – the required minimum and maximum strength limit under indirect tensile stress at 20 °C
 Source: compiled by the authors.

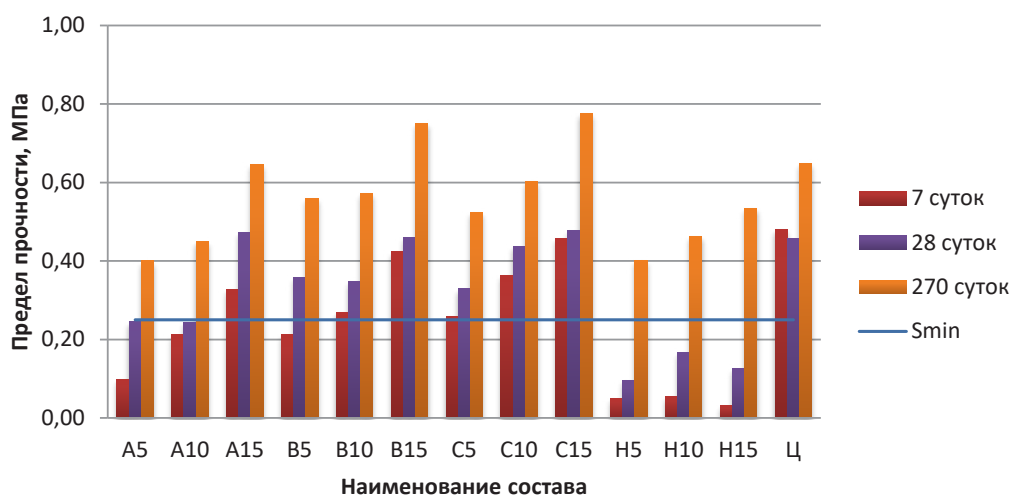


Рисунок 3 – Предел прочности образцов АГБ при непрямом растяжении при температуре 40 °С.
 S_{min} – требуемое минимальное значение предела прочности при непрямом растяжении при температуре 40 °С
 Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Strength limit of asphalt granule concrete samples under indirect tensile stress at 40 °C
 S_{min} – the required minimum and maximum strength limit under indirect tensile stress at 40 °C
 Source: compiled by the authors.

Данные, приведённые на рисунках 1, 2, 3, свидетельствуют о том, что АГБ, укреплённый комплексными минеральными вяжущими всех составов («А», «В», «С») при дозировках МКМВ 15% («А15», «В15», «С15») в нормативном возрасте твердения (7 сут) набрал прочность, соответствующую требованиям как для оснований, так и для покрытий (ОДМ 218.6.1.005–2021, таблицы 4, 5)⁴⁸. При дозировке МКМВ 10% нормативным требованиям отвечают только составы «В10» и «С10» с использованием комплексных вяжущих, активированных 10 и 15% цемента (см. таблицу 1). Составы «А5», «А10», «В5» и «С5» не набрали нормативную прочность. Следовательно, при использовании комплексного вяжущего с дозировкой активатора 5% дозировка МКМВ должна быть не менее 15%.

Наиболее высокие прочностные показатели достигнуты при дозировке МКМВ 15%.

Следует отметить, что прочностные показатели образцов составов «В15» и «С15» аналогичны контрольным образцам состава «Ц», а при испытании при температуре 40 °С в возрасте 270 сут даже превышают их (0,78 МПа против 0,65 МПа). Это объясняется высоким содержанием в шламе белита, который проявляет вяжущие свойства в более поздние сроки твердения⁴⁹ [2]. Кроме того, поверхность зёрен АГ частично покрыта битумом (5,0% сверх 100% от минеральной части), а шлам отличается хорошей адгезией с органическими вяжущими^{47,50}.

В подтверждение настоящих выводов свидетельствуют также данные испытания контрольных образцов АГБ, укреплённого натуральным шламом («Н5», «Н10», «Н15»). Так, если в нормативном возрасте образцы не

набрали требуемую прочность, то в возрасте 270 сут она составила, при температуре испытания 40 °С – 0,4–0,53 МПа, а при температуре 20 °С – 0,58–0,91 МПа, что соответственно в 2 и 2,4 раза выше нормативной и аналогична показателям АГБ укреплённого цементом и комплексными минеральными вяжущими. Решающую роль при этом играет накопление в грубодисперсном натуральном шламе, в поздние сроки твердения, большого резерва не гидратированного белита в виде гелеобразных новообразований, что способствует интенсификации твердения [4, 5, 6]. Но с учётом того, что контрольные образцы «Н5», «Н10» и «Н15» в нормативном возрасте не набрали требуемую прочность, натуральный шлак при дозировках 5–15% не может быть рекомендован в качестве вяжущего для укрепления АГ.

Однако имеется положительный опыт укрепления натуральным шламом каменных материалов при значительном увеличении его дозировок от 20 до 40%, в зависимости от его активности и требуемого модуля упругости конструктивного слоя^{51,52,53}. Следовательно, есть основание считать, что при увеличении дозировок шлама с целью достижения требуемой прочности АГБ в нормативном возрасте (7 сут) и соответствующем экономическом обосновании натуральный шлак может быть использован в качестве вяжущего для укрепления АГ. Окончательные выводы можно сделать после дополнительных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Теоретически обоснована и экспериментально установлена возможность и

⁴⁸ ОДМ 218.6.1.005–2021 Методические рекомендации по восстановлению асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог методом холодной регенерации (с Изменением) : дата введения 2021-02-17. М. : Росавтодор, 2021. 29 с.

⁴⁹ Белоусов Б.В., Гаврилов А.Н., Афонин А.С. Предложения по конструированию дорожных одежд с повышенным сроком службы // Мир дорог. М., 2016. 2 с.

⁵⁰ Артюхина Г.И. Применение бокситовых шламов, обработанных нефтяными гудронами и эмульсиями, при строительстве автомобильных дорог местного значения на северо-западе РСФСР : автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : (05.23.14). Л., 1980. 25 с. : граф. Библиогр.: с. 25 (5 назв.).

⁵¹ Лыткин А.А. Применение белитового шлама для устройства слоев дорожных одежд при отрицательных температурах : автореферат дис. канд. техн. наук : 05. 23. 11 / А. А. Лыткин. 1990. 18 с.

⁵² ОДМ 218.3.043–2015. Методические рекомендации по применению в слоях дорожных одежд натуральных белитовых шламов. Росавтодор Министерства транспорта Российской Федерации. Информавтодор. Издан на основании распоряжения Федерального дорожного агентства от 30.11.2015. № 2283. Р. с., М. 66 с.

⁵³ Бескровный В.М., Дежина Н.С., Лыткин А.А. Устройство щебеночного основания с обработкой нефелиновым шламом // Сб. «Вопросы производства и применения местных каменных материалов из естественных горных пород и отходов промышленности при строительстве дорожных одежд» Тр.СоюздорНИИ. М., 1981. 62–68 с.

целесообразность применения белитового (нефелинового) шлама в качестве основного компонента комплексных минеральных вяжущих.

2. Разработаны рациональные составы комплексных минеральных вяжущих класса 5,0 из нефелинового шлама, активированного 5–15% портландцемента.

3. Рекомендованы оптимальные дозировки комплексных вяжущих для укрепления асфальтогранулята при строительстве оснований и покрытий:

- для составов вяжущих с дозировкой активатора твердения (цемента) 10–15% дозировки вяжущих составляют 5–15%;

- для состава вяжущего с дозировкой активатора 5%, для обеспечения АГБ нормативных требований по прочностным показателям, дозировка вяжущего должна быть не менее 15%.

4. Установлено, что АГБ, укрепленный комплексными вяжущими в поздние сроки твердения (28, 270 сут) имеет прочность, аналогичную или более высокую, чем прочность АГБ, укрепленного цементом, что подтверждает наши теоретические предпосылки об эффективности использования белитового шлама для производства комплексных минеральных вяжущих.

5. Установлены зависимости показателей основных физико-механических свойств АГБ от состава вяжущих и их дозировок для достижения нормативных показателей материала, что позволяет выбирать рациональные составы для проектирования и строительства оснований и покрытий в конкретных условиях строительства.

6. Использование для укрепления асфальтогранулята вяжущих на основе белитового шлама будет способствовать повышению долговечности дорожных конструкций за счёт длительного повышения модуля упругости при значительной экономии цемента и улучшению экологической обстановки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лыткин А.А., Долгих Г.В., Прохыгин А.С. Пути увеличения межремонтных сроков службы автомобильных дорог // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 2(96). С. 290–313. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-290-313>. EDN MJZCRV.

2. Лыткин А.А., Старков Г.Б., Вагнер Е.Я. Исследование эффективности использования белитового шлама для устройства монолитных слоев дорожных одежд методом холодного ресайклинга // Вестник СибАДИ. 2020. Т. 17, № 6(76). С. 764–776. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-764-776>. EDN ROURJD.

3. Aker S.N.A., Ozer H. Cold Recycling Technology for Airfield Pavement Rehabilitation Practices // Transportation Research Record. 2024. <https://doi.org/10.1177/03611981241265844>. EDN JNJDEM.

4. Al-Mohammedawi A., Mollenhauer K. Experimental investigation on fatigue and fracture behaviour of cold recycling materials // Transportation Engineering. 2024. Vol. 17. P. 100258. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2024.100258>. EDN CCAXVE.

5. Lytkin A.A. Study of the transport loads influence on the nature of belite sludge hardening in pavement // Materials Science Forum. 2020. Vol. 992. P. 79–85. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.992.79>. EDN AHDIWP.

6. Левин Б.В., Лисюк Б.С., Луценко К.Л. [и др.] Нефелиновые концентраты и шламы – уникальное сырье для геополлимерных материалов и конструкций // Мир дорог. 2020. № 129–130. С. 91–100. EDN FWCAHQ.

7. Gupta S., Kumar S. A state-of-the-art review of the deep soil mixing technique for ground improvement // Innovative Infrastructure Solutions. 2023. Vol. 8, No. 4. P. 129. <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01098-6> EDN IYBPAN.

8. Pateriya A.S., Robert D.J., Dharavath K., Soni S.K. Stabilization of marble wastes using cement and nano materials for subgrade applications // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 326. P. 126865. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126865>. EDN TLIHPV.

9. Курдюков Р.П., Курдюков Д.П., Мануковский А.Ю. Регенерация асфальтобетонного покрытия // Леса России в XXI веке: сборник научных трудов по итогам Международной научно-технической интернет-конференции, Санкт-Петербург, 26 ноября 2015 года. Выпуск 12. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, 2015. С. 130–135. EDN YLTQPT.

10. Carbone C., Ferrario D., Lanzini A. [et al.] Evaluating the Carbon Footprint of Cement Plants Integrated With the Calcium Looping CO2 Capture Process // Frontiers in Sustainability. 2022. Vol. 3. <https://doi.org/10.3389/frsus.2022.809231>. EDN LSATWR.

11. Strunge T., Renforth Ph., Van Der Spek M. Towards a business case for CO2 mineralisation in the cement industry // Communications Earth and Environment. 2022. Vol. 3, No. 1. P. 1–14. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00390-0>. EDN HJBXQZ.

12. Чижов Р.В., Кожухова Н.И., Строкова В.В., Жерновский И.В. Алюмосиликатные бесклнкерные вяжущие и области их использования // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 4. С. 6–10. EDN VRRFEZ.

13. Кадышев Н.Д., Кожухова Н.И. Перспективы использования доменных гранулированных шлаков при производстве эффективных бесцементных вяжущих // Современные строительные материалы, технологии и конструкции: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию ФГБОУ ВПО «ГГТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова», Грозный, 24–26 марта 2015

года / Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Грозненский государственный нефтяной технический университет им. академика М.Д. Миллионщикова» (ФГБОУ ВПО «ГГНТУ»), г. Грозный. Том 1. Грозный: ФГУП «Издательско-полиграфический комплекс «Грозненский рабочий», 2015. С. 139–143. EDN TUBCCF.

14. Фомина Е.В., Кудярова Н.П., Тюкавкина В.В. Активация гидратации композиционно-го вяжущего на основе техногенного сырья // Строительные материалы. 2015. № 12. С. 61–64. EDN TEPNUS.

15. Strokova V.V., Cherevatova A.V., Pavlenko N.V., Nelubova V.V. Prospects of Application of Zero-Cement Binders of a Nonhydration Hardening Type // *World Applied Sciences Journal*. 2013. Vol. 25, No. 1. P. 119–123. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.25.01.7032>. EDN SHZFGD.

16. Агеева М.С., Алфимова Н.И. Эффективные композиционные вяжущие на основе техногенного сырья / Saarbrücken : LAP LAMBERT, 2015. 75 с. ISBN 978-3-659-79264-9. EDN ULZZOT.

17. Abdila S.R., Abdullah M.M.A.I.B., Ahmad R. [et al.] Potential of Soil Stabilization Using Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) and Fly Ash via Geopolymerization Method: A Review // *Materials*. 2022. Vol. 15, No. 1. P. 375. <https://doi.org/10.3390/ma15010375>. EDN XNCOCU.

18. Coban H.S., Cetin B. Suitability Assessment of Using Lime Sludge for Subgrade Soil Stabilization // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2022. Vol. 34, No. 3. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0004122](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0004122). EDN JXEBVD.

19. Kererat Ch., Kroehong W., Thaipum S., Chindaprasart P. Bottom ash stabilized with cement and para rubber latex for road base applications // *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 17. P. e01259. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01259>. EDN RAEAEU.

20. Парфенова А.А., Синицин Д.А., Глазачев А.О. [и др.]. Комплексные минеральные вяжущие для укрепления грунтов на основе вторичных ресурсов химической и металлургической промышленности // *Техника и технология силикатов*. 2025. Т. 32, № 2. С. 184–194. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2025-184-194>. EDN TAEPAS.

21. Щеткин Е.С., Гзелишвили Д.С. Опыт применения двухкомпонентных комплексных органоминеральных стабилизаторов грунта при строительстве дорог на объекте «Обустройство Ковыктинского газоконденсатного месторождения» // *Газовая промышленность*. 2024. № 11(873). С. 80–83. EDN MACCSK.

22. Хрищатая Е.В., Воробьев Д.В., Шестаков М.А. Эффективность комплексных минеральных вяжущих для укрепления грунтов // *Цемент и его применение*. 2023. № 3. С. 28–31. EDN BNROIA.

23. Асмагулаев Б. А., Асмагулаев Р. Б., Асмагулаев Н.Б. [и др.]. Наномодифицированные медленно твердеющие дорожные бетоны для долговечных автомобильных дорог // *Дороги и мосты*. 2020. № 1(43). С. 180–204. EDN VERIHD.

24. Степанова М.Л., Маркелов Н.А., Гафаров М.Ш. [и др.]. Комплексное использование нефелинового шлама в производстве строительных материалов // *Современные наукоемкие технологии*. 2019. № 3-1. С. 77–82. EDN ZLEZPF.

25. Лесовик В.С., Загороднюк Л.Х., Чулкова И.Л. [и др.]. Средство структур как теоретическая основа проектирования композитов будущего // *Строительные материалы*. 2015. № 9. С. 18–22. EDN UKLIAP.

REFERENCES

1. Lytkin A.A., Dolgih G.V., Prolygin A.S. Puti uvelicheniya mezhremontnykh srokov sluzhby avtomobil'nykh dorog. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*. 2024; T. 21, № 2(96). S. 290–313. (in Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-290-313>. EDN MJZCRV.

2. Lytkin A.A., Starkov G.B., Vagner E.Ja. Issledovanie effektivnosti ispol'zovaniya belitovogo shlama dlja ustrojstva monolitnykh sloev dorozhnykh odezd metodom xolodnogo resajklinga. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*. 2020; T. 17, № 6(76). S. 764–776. (in Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-764-776>. EDN ROURJD.

3. Aker S.N.A., Ozer H. Cold Recycling Technology for Airfield Pavement Rehabilitation Practices. *Transportation Research Record*. 2024; <https://doi.org/10.1177/03611981241265844>. EDN JNJDEM.

4. Al-Mohammedawi, Mollenhauer K.A. Experimental investigation on fatigue and fracture behaviour of cold recycling materials // *Transportation Engineering*. 2024; Vol. 17. P. 100258. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2024.100258>. EDN CCAXVE.

5. Lytkin A.A. Study of the transport loads influence on the nature of belite sludge hardening in pavement // *Materials Science Forum*. 2020; Vol. 992. P. 79–85. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.992.79>. EDN AHDWIP.

6. Levin B.V., Lisjuk B.S., Lucenko K.L. [i dr.] Nefelinovye koncentraty i shlamy - unikal'noe syr'e dlja geopolimernyx materialov i konstrukcij. *Mir dorog*. 2020; № 129–130. S. 91–100. EDN FWCAHQ. (in Russ.)

7. Gupta S., Kumar S. A state-of-the-art review of the deep soil mixing technique for ground improvement. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2023; Vol. 8, No. 4. P. 129. <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01098-6>. EDN IYBPAN.

8. Pateriya A.S., Robert D.J., Dharavath K., Soni S.K. Stabilization of marble wastes using cement and nano materials for subgrade applications. *Construction and Building Materials*. 2022; Vol. 326. P. 126865. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126865>. EDN TLIHPV.

9. Kurdjukov R.P., Kurdjukov D.P., Manukovskij A.Ju. Regeneracija asfal'tobetonnoho pokrytija. *Lesa Rossii v XXI veke* : sbornik nauchnyx trudov po itogam mezhdunarodnoj naučno-texničeskoj internet-konferencii, Sankt-Peterburg, 26 nojabrja 2015

года. Tom Vypusk 12. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj lesotexničeskij universitet im. S.M. Kirova, 2015; S. 130-135. EDN YLTQPT. (in Russ.)

10. Carbone C., Ferrario D., Lanzini A. [et al.] Evaluating the Carbon Footprint of Cement Plants Integrated With the Calcium Looping CO₂ Capture Process. *Frontiers in Sustainability*. 2022; Vol. 3. <https://doi.org/10.3389/frsus.2022.809231>. EDN LSATWR.

11. Strunge T., Renforth Ph., Van Der Spek M. Towards a business case for CO₂ mineralisation in the cement industry. *Communications Earth and Environment*. 2022; Vol. 3, No. 1. P. 1-14. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00390-0>. EDN HJBXQZ.

12. Čižov R.V., Kožuxova N.I., Strokova V.V., Žernovskij I.V. Aljumosilikatnye besklinskernye vjažuščie i oblasti ix ispol'zovanija. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo texnologičeskogo universiteta im. V.G. Šuxova*. 2016; № 4. S. 6-10. EDN VRRFEZ. (in Russ.)

13. Kadyšev N.D., Kožuxova N.I. Perspektivy ispol'zovanija domennyx granulirovannyx šlakov pri proizvodstve éffektivnyx bescementnyx vjažuščix. *Sovremennye stroitel'nye materialy, tehnologii i konstrukcii* : Materialy Meždunarodnoj naučno-praktičeskoj konferencii, posvjaščennoj 95-letiju FGBOU VPO "GGNTU im. akad. M.D. Millionščikova", Groznyj, 24–26 marta 2015 goda / Federal'noe gosudarstvennoe bjudžetnoe obrazovatel'noe učreždenie vysšego professional'nogo obrazovanija «Grozenskij gosudarstvennyj neftjanij texničeskij universitet imeni akademika M.D. Millionščikova» (FGBOU VPO «GGNTU»), g. Groznyj. Groznyj: FGUP «Izdatel'sko-poli-grafičeskij kompleks «Grozenskij rabočij», 2015; 1; S. 139-143. EDN TUBCCF. (in Russ.)

14. Fomina E.V., Kudejarova N.P., Tjukavkina V.V. Aktivacija gidratacii kompozicionnogo vjažuščegona osnove texnogennogo syr'ja. *Stroitel'nye materialy*. 2015; № 12. S. 61-64. EDN TEPNUS. (in Russ.)

15. Strokova V.V., Cherevatova A.V., Pavlenko N.V., Nelubova V.V. Prospects of Application of Zero-Cement Binders of a Nonhydration Hardening Type. *World Applied Sciences Journal*. 2013; Vol. 25, No. 1. P. 119-123. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.25.01.7032>. EDN SHZFGD.

16. Ageeva M.S., Alfimova N.I. Éffektivnye kompozicionnye vjažuščie na osnove texnogennogo syr'ja. Saarbrücken : LAP LAMBERT, 2015. 75 s. ISBN 978-3-659-79264-9. EDN ULZZOT. (in Russ.)

17. Abdila S.R., Abdullah M.M.A.I.B., Ahmad R. [et al.] Potential of Soil Stabilization Using Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) and Fly Ash via Geopolymerization Method: A Review. *Materials*. 2022; Vol. 15, No. 1. P. 375. <https://doi.org/10.3390/ma15010375>. EDN XNCOCU.

18. Coban H.S., Cetin B. Suitability Assessment of Using Lime Sludge for Subgrade Soil Stabilization / H. S. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2022; Vol. 34, No. 3. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0004122](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0004122). EDN JXEBVD.

19. Kererat Ch., Kroehong W., Thaipum S., Chindaprasit P. Bottom ash stabilized with cement and para rubber latex for road base applications. *Case*

Studies in Construction Materials. 2022. Vol. 17. P. e01259. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01259>. EDN RAEAEU.

20. Parfenova A.A., Sinicin D.A., Glazačev A.O. [i dr.] Kompleksnye mineral'nye vjažuščie dlja ukreplenija gruntov na osnove vtoričnyx resursov ximičeskoj i metallurģičeskoj promyšlennosti. *Texnika i tehnologija silikatov*. 2025; T. 32, № 2. S. 184-194. (in Russ.) <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2025-184-194>. EDN TAEPAS.

21. Ščetkin E.S., Gzelišvili D.S. Opyt primenenija dvuxkomponentnyx kompleksnyx organomineral'nyx stabilizatorov grunta pri stroitel'stve dorog na ob"ekte «Obustrojstvo Kovyktinskogo gazokondensatnogo mestoroždenija». *Gazovaja promyšlennost'*. 2024; № 11(873). S. 80-83. EDN MACCSK. (in Russ.)

22. Xriščataja E.V., Vorob'ev D.V., Šestakov M.A. Éffektivnost' kompleksnyx mineral'nyx vjažuščix dlja ukreplenija gruntov. *Cement i ego primenenie*. 2023; № 3. S. 28-31. EDN BNROIA. (in Russ.)

23. Asmatulaev B.A., Asmatulaev R.B., Asmatulaev N. B. [i dr.] Nanomodificirovannye medlenno tverdejuščie dorožnye betony dlja dolgovečnyx avtomobil'nyx dorog. *Dorogi i mosty*. 2020; № 1(43). S. 180-204. EDN VERIHD. (in Russ.)

24. Stepanova M.L., Markelov N.A., Gafarov M.Š. [i dr.] Kompleksnoe ispol'zovanie nefelinovogo šlama v proizvodstve stroitel'nyx materialov. *Sovremennye naukoemkie tehnologii*. 2019; № 3-1. S. 77-82. EDN ZLEZPF. (in Russ.)

25. Lesovik V.S., Zagorodnjuk L.X., Čulkova I.L. [i dr.] Srodstvo struktur kak teoretičeskaja osnova proektirovanija kompozitov buduščego. *Stroitel'nye materialy*. 2015; № 9. S. 18-22. EDN UKLIAP. (in Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Лыткин А.А. Постановка цели и задачи исследования, анализ и обобщение литературных источников, формулирование заключения.

Долгих Г.В. Анализ и обобщение литературных источников, осуществление критического анализа и доработка текста.

Пролыгин А.С. Проведение лабораторных испытаний, редактирование текста, оформление результатов исследования в графиках и таблицах.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Lytkin Alexandr A. Setting the goals and objectives of the study, analyzing and summarizing the literary sources, formulating the conclusion.

Dolgikh Gennadiy V. Analysis and synthesis of literary sources, critical analysis and revision of the text.

Prolygin Aleksandr S. Execution of laboratory tests, editing the text, presenting research results in graphs and tables.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лыткин Александр Александрович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, доц.

кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (644050, г. Омск, просп. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5257-0502>,

Scopus ID: 57217279492,

e-mail: alx.lytkin2016@yandex.ru

Долгих Геннадий Владимирович – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Строительство и эксплуатация дорог» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (644050, г. Омск, просп. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7582-3939>,

Scopus ID: 57199391542,

SPIN-код: 7079-8998,

e-mail: dolgikh-gv@yandex.ru

Пролыгин Александр Сергеевич – преподаватель кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (644050, г. Омск, просп. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1395-0553>,

Scopus ID: 57222243670,

SPIN-код: 4526-5078,

e-mail: aleksandrprolygin@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lytkin Alexandr Aleksandrovich – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor, Road Construction and Operation Department, Siberian State Automobile and Highway University (5, Prospect Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5257-0502>,

Scopus ID: 57217279492,

e-mail: alx.lytkin2016@yandex.ru

Dolgikh Gennadiy Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Road Construction and Operation Department, Siberian State Automobile and Highway University (5, Prospect Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7582-3939>,

Scopus ID: 57199391542,

SPIN-code: 7079-8998,

e-mail: dolgikh-gv@yandex.ru

Prolygin Aleksandr Sergeevich – Lecturer, Road Construction and Operation Department, Siberian State Automobile and Highway University (5, Prospect Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1395-0553>,

Scopus ID: 57222243670,

SPIN-code: 4526-5078,

e-mail: aleksandrprolygin@mail.ru