

Научная статья
УДК 625.7/8
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-290-313>
EDN: MJZCRV



ПУТИ УВЕЛИЧЕНИЯ МЕЖРЕМОНТНЫХ СРОКОВ СЛУЖБЫ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

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

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

✉ ответственный автор
aleksandrprolygin@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время более 96% дорог нашей страны построены с дорожными одеждами нежесткого типа с основаниями из дисперсных материалов щебня, песчано-гравийных смесей, песка и др. Существенными недостатками таких дорожных конструкций являются высокая материалоемкость и значительные затраты на эксплуатацию, связанные в том числе с низкими межремонтными сроками службы. По экспертным оценкам потери России из-за низкого качества сети автомобильных дорог составляют 3% валового внутреннего продукта. В 2017 году правительством принято решение об увеличении межремонтных сроков эксплуатации автомобильных дорог федерального значения, например по капитальному ремонту с 12 до 24 лет. Для решения задачи увеличения межремонтных сроков необходимо обеспечить на вновь строящихся или ремонтируемых дорогах значительное повышение общего модуля упругости. Одним из эффективных путей повышения прочностных показателей дорожных одежд нежесткого типа является более широкое применение монолитных оснований из грунтов или асфальтового гранулята, обработанных минеральными вяжущими, а также отходов промышленности, обладающих самостоятельными вяжущими свойствами. Замена оснований из дисперсных материалов на монолитные позволяет снизить материалоемкость дорожной одежды на 20–50%, стоимость строительных работ до 45% и повысить срок службы дорог на 35–40%.

Материалы и методы. С целью изучения влияния вида заполнителя на процессы структурообразования шламощебеночных материалов провели исследования по укреплению гранитного щебня фракции 0–15 мм и щебня из слабоактивного доменного шлака, 15% нефелинового шлама. Образцы диаметром и высотой 7 см формовали из смесей оптимальной влажности прессованием под нагрузкой 15 МПа. Образцы хранили в нормальных условиях и испытывали в возрасте 1, 3, 6 и 9 месяцев для определения предела прочности на сжатие и растяжение при изгибе. С целью определения оптимальных дозировок шлама для укрепления шлакового щебня по аналогичной методике формовали образцы с содержанием шлама: 5, 10, 20, 30% и испытывали их на сжатие и раскол сразу после изготовления и затем через 1, 3, 6, 9 и 12 месяцев твердения. При обследовании опытных участков покрытий переходного типа на первой стадии строительства нефтепромысловых дорог определяли общие модули упругости с помощью рычажного прогибомера МАДИ-ЦНИЛ и груженого автомобиля МАЗ-500А. Для изучения кинетики твердения шламогранулобетона из асфальтового гранулята, укрепленного молотым шламом, изготавливали образцы диаметром 71,4 мм прессованием под давлением 7 МПа, по стандартной методике. Серии образцов отличались дозировкой молотого шлама 10% и 15% и условиями их твердения. Образцы хранили в нормальных условиях и в естественных (на открытом воздухе), в ящике с песком, для моделирования температурного режима твердения материала в основании дорожной одежды и испытания в возрасте 7, 28, 90, 180 и 360 сут при температурах 200 С и 500 С.

Результаты. Выполнен анализ нормативных и литературных источников по вопросам увеличения межремонтных сроков службы автомобильных дорог. Даны отдельные предложения по внесению изменений в действующие нормативные документы для публичного обсуждения. Приведены физико-химические и физико-механические свойства белитовых шламов – многотоннажных отходов глиноземного производства. Показана область их применения при строительстве, реконструкции и ремонте автомобильных дорог. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена высокая эффективность применения белитовых шламов в качестве медленнотвердеющих вяжущих с целью продления межремонтных сроков службы дорог при устройстве монолитных оснований и покрытий переходного типа. Разработана

© Лыткин А.А., Долгих Г.В., Пролыгин А.С., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ны рациональные конструкции покрытий при строительстве нефтепромысловых дорог в заболоченных регионах Сибири с заменой сборных железобетонных покрытий на первой стадии строительства на монолитные покрытия переходного типа из каменных материалов, укрепленных белитовыми шламами. Выполнены лабораторные и опытно-экспериментальные исследования по обоснованию замены традиционных вяжущих на молотый нефелиновый шлам при ремонте асфальтобетонных покрытий методом холодного ресайклинга с продлением строительного сезона.

Заключение. За последние 30 лет на дорогах России значительно увеличилось количество тяжеловесных транспортных средств. Одновременно с этим возросли требования к межремонтным срокам службы нежестких дорожных одежд. Увеличение сроков службы в принципе вполне возможно, но требует внедрения инновационных конструктивных решений на стадии проектирования, строительства, реконструкции и ремонта с использованием высокоэффективных материалов и технологий с целью значительного повышения общего модуля упругости, в частности путем замены оснований дорожных одежд из дисперсных материалов на монолитные. Необходимо более широко внедрять технологии устройства оснований из местных грунтов, обработанных минеральными вяжущими (цемент, известь, активные золы-уноса и др.), а также отходов промышленности, обладающие самостоятельными вяжущими свойствами, например белитовыми шламами. Кроме того, необходимо продолжить исследования по разработке комплексных медленноотвердеющих безобжиговых, в том числе геополимерных вяжущих на основе отходов промышленности специально для укрепления грунтов и каменных материалов с разработкой нормативных документов в развитии ТР ТС 014/2011. При ремонте и капитальном ремонте дорог для восстановления несущей способности слоев щебеночных (гравийных) оснований и усиления нежестких дорожных одежд предпочтение следует отдавать методу холодной регенерации. На каждом этапе жизненного цикла автомобильных дорог имеются резервы для увеличения межремонтных сроков, которые необходимо реализовывать.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: межремонтные сроки, медленноотвердеющее вяжущее, шламощебеночный материал, метод холодного ресайклинга, белитовый шлам, монолитные основания, шламогранулобетон

Статья поступила в редакцию 07.12.2023; одобрена после рецензирования 26.02.2024; принята к публикации 22.04.2024.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Лыткин А.А., Долгих Г.В., Прохыгин А.С. Пути увеличения межремонтных сроков службы автомобильных дорог // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 2. С. 290-313. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-24-21-2-290-313>

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-290-313>

EDN: MJZCRV

WAYS TO INCREASE THE INTER-MAINTENANCE PERIOD OF ROADS

Alexander A. Lytkin, Gennady V. Dolgikh, Aleksandr S. Prolygin ✉

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),

Omsk, Russia

✉ corresponding author
aleksandrprolygin@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Currently, more than 96% of the roads in our country are built with non-rigid pavements with bases made of dispersed materials of crushed stone, sand-gravel mixtures, sand, etc. Significant disadvantages of such road structures are high material consumption and significant operating costs, including those associated with low service life between repairs. According to expert estimates, Russia's losses due to the poor quality of the highway network amount to 3% of gross domestic product. In 2017, the government decided to increase service life between

© Lytkin A. A., Dolgikh G.V., Prolygin A.S., 2024



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

repairs of federal highways, for example, for major repairs from 12 to 24 years. To solve the problem of increasing the time between repairs, it is necessary to ensure a significant increase in the total modulus of elasticity on newly constructed or repaired roads. One of the effective ways to increase the strength characteristics of non-rigid road pavements is the wider use of monolithic bases made from soils or asphalt granulate treated with mineral binders, as well as industrial wastes with own binding properties. Replacing bases made of dispersed materials with monolithic ones makes it possible to reduce the material consumption of road pavement by 20-50%, the cost of construction work by up to 45% and increase the service life of roads by 35-40%.

Materials and methods. In order to study the influence of the type of filler on the processes of structure formation of sludge crushed stone material, research on the strengthening of granite crushed stone of the 0-15 mm fraction and crushed stone from low-active blast furnace slag, 15% nepheline sludge was carried out. Samples with a diameter and height of 7 cm from mixtures of optimal humidity by pressing under a load of 15 MPa were formed. The samples under normal conditions and tested at the ages of 1, 3, 6 and 9 months to determine the compressive and tensile strength in bending were stored. In order to determine the optimal dosages of sludge for strengthening slag crushed stone, samples with a sludge content of 5, 10, 20, 30% were formed using a similar method and tested for compression and splitting immediately after production and then after 1, 3, 6, 9 and 12 months hardening. When examining experimental sections of transitional type coatings at the first stage of construction of oil field roads, the total elastic moduli were determined using a MADI-TsNIL deflectometer and a loaded MAZ-500A vehicle. To study the hardening kinetics of sludge-granular concrete from asphalt granulate, reinforced with ground sludge, samples with a diameter of 71.4 mm by pressing under a pressure of 7 MPa, according to standard methods were prepared. The series of samples differed in the dosage of ground sludge (10% and 15%) and their hardening conditions. The samples under normal conditions and in natural conditions (in the open air) in a box with sand, to simulate the temperature regime of hardening of the material in the base of the road pavement and tested at the age of 7, 28, 90, 180 and 360 days at temperatures of 200C and 500C were stored.

Results. The analysis of normative and literary sources on the issues of increasing the interrepair service life of highways is carried out. Separate proposals for amending current regulatory documents for public discussion are given. The physico-chemical and physico-mechanical properties of belite sludge – large-tonnage waste from alumina production – are presented. The scope of their application in the construction, reconstruction and repair of highways is shown. The high efficiency of using belite sludge as a slow-hardening binder in order to extend the service life of roads during the construction of monolithic bases and transitional coatings has been theoretically substantiated and experimentally confirmed. Rational pavement designs for the construction of oil field roads in the swampy regions of Siberia with the replacement of prefabricated reinforced concrete pavements at the first stage of construction with monolithic transitional pavements made of stone materials reinforced with belite sludge have been developed. Laboratory and experimental research to justify the replacement of traditional binders with ground nepheline sludge when repairing asphalt concrete pavements using the cold recycling method with an extension of the construction season were carried out.

Conclusion. Over the past 30 years, the number of heavy vehicles has significantly increased on the roads of Russia. At the same time, the requirements for the service life between repairs of flexible road pavements have increased. Increasing service life, in principle, is quite possible, but requires the introduction of innovative design solutions at the design, construction, reconstruction and repair stages using highly efficient materials and technologies in order to significantly increase the total elastic modulus, in particular by replacing road pavement bases made of dispersed materials with monolithic ones. It is necessary to more widely introduce technologies for constructing foundations from local soils treated with mineral binders (cement, lime, active fly ash, etc.), as well as industrial waste with independent binding properties, for example belite sludge. In addition, it is necessary to continue research on the development of complex slow hardening non firing, including geopolymers binders based on industrial waste specifically for strengthening soils and stone materials with the development of regulatory documents in the development of TR CU 014/2011. When repairing and overhauling roads to restore the bearing capacity of layers of crushed stone (gravel) bases and strengthening flexible road pavements, preference should be given to the cold regeneration method. At each stage of the life cycle of highways, there are reserves for increasing the time between repairs that must be implemented.

KEYWORDS: inter-maintenance period, slow-hardening binder, sludge crushed stone material, cold recycling method, belite sludge, monolithic bases, sludge-granular concrete

The article was submitted 07.12.2023; approved after reviewing 26.02.2024; accepted for publication 22.04.2024.

All 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. Ways to increase the inter-maintenance period of roads. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (2): 290-313. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-024-21-2-290-313>

ВВЕДЕНИЕ

Эксперты Всемирного экономического форума (ВЭФ) оценили качество автомобильных дорог по 7-балльной шкале. Россия по итогам опроса получила суммарный балл 2,9 и заняла 114 место из 137 государств, участвующих в рейтинге¹.

По экспертным оценкам, потери России из-за низкого качества сети автомобильных дорог составляют 3% валового внутреннего продукта, что в 6 раз выше, чем в странах Европейского Союза (ЕС).

За последние 10 лет при росте уровня автомобилизации на 85% увеличение протяженности автомобильных дорог общего пользования составило всего 15,7%². Согласно открытым источникам 14,9% дорог федерального значения³, 49% дорог регионального и межмуниципального значения⁴ по своим транспортно-эксплуатационным показателям не отвечают нормативным требованиям.

Около 50% общего объема перевозок по автомобильным дорогам федерального значения осуществляется в условиях превышения нормативного уровня загрузки дорожной сети, что приводит к увеличению себестоимости перевозок и снижению безопасности движения.

С целью удовлетворения потребностей социально-экономического развития страны была разработана государственная программа «Развития транспортной системы»⁵ и транспортная стратегия РФ на период до 2030 года⁶.

Данные документы охватывают все виды транспортных комплексов, в том числе и ав-

томобильного. В стратегии определены миссия и стратегические приоритеты развития транспортного комплекса России, в том числе и опорной сети автомобильных дорог, которая обеспечивает большую часть автомобильных грузовых и пассажирских перевозок. Она направлена на опережающее удовлетворение ожиданий основных пользователей и потребителей, а также на ускоренное внедрение инновационных технологий и материалов, в том числе отходов промышленности.

В соответствии с разработанным правительством комплексным пятилетним планом дорожной деятельности на 2023–2027 гг. будет построено и реконструировано более 4 тыс. км автодорог и 110 тыс. км отремонтировано. Следовательно, разработка и внедрение высокоэффективных технологий и материалов при строительстве, реконструкции и ремонте автомобильных дорог является актуальной задачей.

В настоящее время более 96% дорог нашей страны с дорожными одеждами нежесткого типа с основаниями из дискретных материалов. Одним из существенных недостатков таких дорожных конструкций являются значительные затраты на эксплуатацию, связанные в том числе с сокращением межремонтных периодов и общих сроков службы.

Следует отметить, что в 2017 г. правительством принято решение об увеличении межремонтных сроков эксплуатации автомобильных дорог федерального значения, например по капитальному ремонту с 12 до 24 лет⁷. Увеличение сроков межремонтной эксплуатации

¹ Нечаев А.С. Дороги в России плохие. Но не самые плохие / Нечаев А.С. [Электронный ресурс] // Автомобильный портал Юга России «Avto25.ru»: [сайт]. URL: <https://www.avto25.ru/news/roads/2018/06/10/37765.html> (дата обращения: 21.11.2023).

² Постановление Правительства РФ от 05.12.2001 N 848 (ред. от 20.09.2017, с изм. от 12.10.2017) «О Федеральной целевой программе «Развитие транспортной системы России (2010–2021 годы)» // <https://www.consultant.ru> (дата обращения: 21.11.2023).

³ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 года № 3363-р «Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» // <https://www.consultant.ru> (дата обращения: 21.11.2023).

⁴ Целевые показатели национального проекта «Безопасные качественные дороги». [Электронный ресурс] // Безопасные качественные дороги РФ: [сайт]. URL: <https://bkdrf.ru/home/statistics> (дата обращения: 21.11.2023).

⁵ Постановление Правительства РФ от 20.12.2017 N 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: 21.11.2023).

⁶ Целевые показатели национального проекта «Безопасные качественные дороги». [Электронный ресурс] // Безопасные качественные дороги РФ: [сайт]. URL: <https://bkdrf.ru/home/statistics> (дата обращения: 21.11.2023).

⁷ 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: 21.11.2023).

касается автодорог I–IV категории. Ранее межремонтный интервал составлял от 4 до 8 лет в зависимости от категории дороги, а в случае капитального ремонта – от 10 до 18 лет.

В целом крупные дорожные работы теперь должны будут производиться реже. Так, капремонт (замена верхнего и нижнего слоев, ремонт основания) дороги I категории теперь будет проводиться один раз в 24 года. Обычный ремонт с заменой верхнего и нижнего слоев

покрытия – один раз в 12 лет. Для решения задачи увеличения межремонтных сроков необходимо обеспечить на вновь строящихся или капитально ремонтируемых дорожных конструкциях значительное повышение общего модуля упругости в расчетный период весеннего переувлажнения грунтов.

Анализ нормативных и литературных источников по вопросу увеличения межремонтных сроков

Следует отметить, что некоторые специалисты и ученые дорожной отрасли считают, что принятые межремонтные сроки службы дорожных одежд и покрытий требуют дополнительного обоснования и корректировки. Например, в работах О.А. Красикова и И.Н. Косенко акцентировано внимание на то, что принятое равенство межремонтных сроков службы для всех типов нежестких дорожных одежд для I–IV категорий дорог носит дискуссионный характер, хотя бы из тех соображений, что одежда облегченного типа не может быть такой же долговечной, как одежда капитального типа, а переходный тип предназначен на переходный период, который не может длиться 24 г. [1]. Это также следует из методических положений по расчету нежестких дорожных одежд с разными уровнями надежности, коэффициентами запаса прочности, требуемыми модулями упругости, применяемыми материалами в конструктивных слоях для различных типов нежестких дорожных одежд.

Кроме того, увеличение межремонтного срока с 18 до 24 лет повлечет за собой увеличение в расчетах требуемого модуля упругости, а значит, прочность проектируемой дорожной одежды будет увеличена на 25–30%, что, естественно, приведет к увеличению сметной стоимости строительства, и это сле-

дует учитывать при вариантном проектировании дорожных конструкций.

Однако создание современных конструкций дорожных одежд, которые могли бы служить 24 года и даже значительно дольше, как это изложено в работах⁸ [2, 3, 4], вполне возможно, более того, данному вопросу необходимо уделить особое внимание. Но речь идет о конструкциях не переходного типа и даже не облегченного, а капитальных на прочном основании. При этом необходимо периодически восстанавливать ровность и сцепные качества верхнего слоя покрытия, согласно нормативным требованиям [1].

Принимая во внимание многообразие дорожно-климатических зон, воздействие холода, атмосферных осадков, грунтовых вод и постоянно увеличивающихся нагрузок на автомобильные дороги, принятые межремонтные сроки службы (увеличение в 2–4 раза) для дорожных одежд нежесткого типа, по мнению А.М. Кулижникова (ФАУ «РОСДОРНИИ»), без внесения существенных изменений в нормативную базу на проектирование дорог трудно достижимы [5, 6].

Например, при проектировании дорожных одежд в Германии модуль упругости грунтов земляного полотна назначают, согласно RSTO 01 «Нормы и правила по стандартизации конструкций дорожных одежд»⁹, равным не менее 45 МПа для всех типов дорожных одежд. По климатическим характеристикам территория Германии относится к категории не ниже IV ДКЗ России, с относительно сухими грунтами и глубоким залеганием уровня грунтовых вод. В то же время следует отметить, что территория Российской Федерации расположена в основном в I–II ДКЗ. И в лучшем случае модуль упругости на поверхности земляного полотна из местных грунтов (при проектировании по ранее действующим нормам) будет принят не выше 25 МПа.

Стабилизация грунтов рабочего слоя может придать этим грунтам дополнительные положительные качества и в первую очередь такие, как гидрофобность, снижение капиллярного водонасыщения, повышение плотности при снижении оптимальной влажности и расчетной влажности при весеннем оттаивании, а также дает возможность использовать

⁸ Долговечные асфальтобетонные покрытия автомобильных дорог, мостов и улиц / Веренько В.А. [и др.] / под ред. В.А. Веренько. Минск: Арт Дизайн, 2015. 291 с.

⁹ RSTO 01. Нормы и правила по стандартизации конструкций дорожных одежд: пер. с нем. яз. М.: СРО НП «МОД «СОЮЗДОРСТРОЙ»; ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2010. 52 с. [Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen. FGSV. Ausgabe 2001].

местные связные грунты, за счет снижения до требуемых величин их морозного пучения^{10,11} [7, 8, 9, 10, 11, 12].

К сожалению, при рассмотрении вопросов повышения межремонтных сроков службы дорожных конструкций основное внимание уделяется верхним слоям дорожной одежды, что отражено, например, в ОДМ 218.2.065–2015¹². Но как бы качественно не были построены верхние слои покрытия, при деформациях в нижних слоях дорожной конструкции будут разрушаться и верхние слои. Следовательно, для продления межремонтных сроков необходимо идти по пути обязательного улучшения свойств грунтов земляного полотна и подстилающего основания.

В настоящее время в целях повышения сроков службы и снижения затрат на устройство дорогостоящей дорожной одежды требования к модулю упругости на поверхности рабочего слоя земляного полотна, в соответствии с ПНСТ 542-2021¹³ повышены. В зависимости от дорожно-климатической зоны (ДКЗ) он должен быть не ниже следующих значений:

- 60 МПа – в ДКЗ I и II;
- 53 МПа – в ДКЗ III;
- 45 МПа – в ДКЗ IV, V.

Для достижения настоящих требований могут быть выполнены следующие мероприятия: укрепление грунта верхней части рабочего слоя вяжущими или местными материалами; стабилизация грунта рабочего слоя, в том числе с применением высокодисперсных инъекционных растворов^{14,15}.

Выбор методов повышения прочности грунтов земляного полотна определяется на осно-

ве технико-экономического сравнения вариантов.

Как отмечалось ранее, большая часть дорог в России построена с основаниями из дисперсных материалов (щебня, щебеночно-песчаной смеси (ЩПС) и т.д.). К основным недостаткам этих материалов можно отнести: высокую стоимость, вызванную большой дальностью их транспортировки до объекта; неровную поверхность слоя, сопровождающуюся перерасходом материала покрытия; непрочную контактную структуру, снижающую срок эксплуатации; отсутствие количественного критерия контроля качества уплотнения материала.

Кардинальное повышение межремонтных сроков эксплуатации нежестких дорожных одежд потребует увеличения минимального общего модуля упругости в зависимости от категории дороги не менее чем на 5–10%. В свою очередь для достижения такого повышения прочности традиционных конструкций с основаниями из дисперсных материалов потребуется увеличить толщину слоев основания из этих материалов на 30–45%, что сопряжено со значительным повышением материалоемкости и, соответственно, сметной стоимости.

Одним из эффективных путей продления межремонтных сроков является более широкое применение оснований из грунтов, обработанных минеральными вяжущими (цемент, известь, активные золы-уноса и др.), а также отходы промышленности (шлаки металлургической промышленности, золошлаковые смеси и др.)¹⁶[13]. Данное направление согласуется с рекомендациями по увеличению

¹⁰ Соловьев Д.В. Эффективные способы стабилизации и укрепления глинистого грунта // Инновационные технологии в строительстве и геоэкологии: материалы VIII Международной научно-практической интернет-конференции, Санкт-Петербург, 23 июня 2021 года. Москва: ООО «Издательство «Спутник+», 2021. С. 46–49. EDN AWTUYS.

¹¹ Бондаренко В.С. Технология укрепления земляного полотна автомобильной дороги полимерно – минеральными добавками // ИННОВАЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ: КЛЮЧЕВЫЕ ПРОБЛЕМЫ И НАПРАВЛЕНИЯ их РЕШЕНИЯ: сборник статей Международной научно-практической конференции, Калуга, 1 августа 2023 года. Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «Азтерна», 2023. С. 17–29. EDN HVNBLU.

¹² ОДМ 218.2.065–2015 Методические рекомендации по увеличению межремонтных сроков службы нежестких дорожных одежд. Электрон. дан. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200133426> (дата обращения: 21.11.2023).

¹³ ПНСТ 542–2021 Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования (с Поправками): дата введения 2021-06-01. М.: Стандартинформ, 2021. 90 с.

¹⁴ ОДМ 218.1.004–2011 Классификация стабилизаторов грунтов в дорожном строительстве: дата введения 2011-12-27. М.: ФГУП «ИНФОРМАВТОДОР», 2012. 8 с.

¹⁵ ОДМ 218.3.076–2016 Методические рекомендации по подбору стабилизаторов грунтов и грунтовых смесей для дорожного строительства: дата введения 2017-04-04. М.: Росавтодор, 2017. 37 с.

¹⁶ ОДМ 218.3.119–2019 Методические рекомендации по применению нежестких дорожных одежд с основаниями из укрепленных или обработанных вяжущими каменных материалов и грунтов : дата введения 2020-06-08. М.: Росавтодор, 2022. 99 с.

межремонтных сроков службы нежестких дорожных одежд (ОДМ 218.2.065–2015, п. 5)¹⁷. Такие дорожные одежды при меньшей материалоемкости имеют более высокий общий модуль упругости и меньшую склонность к накоплению остаточных деформаций.

Замена основания из дисперсных материалов на грунт, обработанный неорганическим вяжущим, при сохранении той же толщины слоев приводит к повышению общего модуля упругости дорожной одежды в 1,5–2 раза, что может обеспечить значительное увеличение ресурса дорожной конструкции по критерию упругого прогиба и пропорционально увеличить срок службы дорожной одежды между капитальными ремонтами.

Дорожная одежда нежесткого типа с основанием из укрепленных материалов, равнопрочная нежесткой дорожной одежде со слоями основания из песка и щебня, может иметь толщину слоев основания в 2,5...3 раза меньше (при сохранении той же толщины асфальтобетонных слоев). Это обеспечивает экономический эффект за счет снижения использования привозных, и потому дорогостоящих, каменных материалов (в России более 20 областей не имеют местных каменных материалов). Техничко-экономические расчеты, проведенные с учетом фактических производственных расходов, показывают, что замена оснований из привозных каменных материалов на равнопрочные основания из местных грунтов, укрепленных вяжущими, приводит к понижению стоимости дорожной одежды на 20–60%. В целом срок службы таких дорог на 35–40% выше, а приведенные затраты на строительство и ремонт в течение нормативного срока службы на 40–50% ниже, чем у нежестких дорожных одежд с основаниями из щебня и песка¹⁸.

Также следует обратить внимание на изменения в основных дорожных нормативах.

Например, в СНиП 3.06.03–85¹⁹ до его актуализации был раздел по технологии устройства щебеночных оснований, обработанных не на полную глубину пескоцементной смесью методом пропитки (вдавливания), в СП 78.13330.2012²⁰ по непонятным причинам эту технологию заменили на перемешивание щебня с пескоцементной смесью. Однако отмечено «пескоцементная смесь может быть распределена не на полную глубину щебеночного (гравийного) слоя» – метод не указывается.

Наиболее эффективна технология пропитки щебня пескоцементной смесью с использованием кулачкового катка, что позволяет не только увеличить толщину обрабатываемого слоя, но и регулировать ее числом проходов катка (а. с. 960348)^{21,22}. Эта технология, отличающаяся высокой эффективностью и простотой, отработана в производственных условиях, в том числе в зимний период, при строительстве дорог в Красноярском крае и была включена в ранее действующий СНиП. Необходимо вернуть этим технологиям нормативный документ.

Одним из недостатков монолитных оснований является образование под влиянием естественных и неизбежных объемных деформаций материалов (прежде всего, температурных) трещин с различным шагом, которые передаются на асфальтобетонное покрытие (отраженные трещины).

Трещины нарушают целостность и монолитность дорожной одежды, разделяя ее на отдельные, не связанные между собой блоки. В результате нагрузка от колеса автомобиля передается на значительно ослабленную конструкцию, распределяется на меньшую площадь, создавая повышенные напряжения и деформации.

Шаг трещин, обусловленных не силовыми объемными деформациями, должен быть не

¹⁷ ОДМ 218.2.065–2015 Методические рекомендации по увеличению межремонтных сроков службы нежестких дорожных одежд. Электрон. дан. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200133426> (дата обращения: 07.04.2017).

¹⁸ ОДМ 218.3.119–2019 Методические рекомендации по применению нежестких дорожных одежд с основаниями из укрепленных или обработанных вяжущими каменных материалов и грунтов : дата введения 2020-06-08. М.: Росавтодор, 2022. 99 с.

¹⁹ СНиП 3.06.03–85 Автомобильные дороги: дата введения 1986-01-01. М.: ФГУП ЦПП, 2006. 131 с.

²⁰ СП 78.13330.2012 Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 3.06.03–85: дата введения 2013-07-01. М.: Минрегион России, 2013. 67 с.

²¹ 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. М., 1990. 18 с.

²² А.С. 960348, СССР. М.Кл.³ Е 01 С 3/00. Способ возведения дорожного и аэродромного основания / Бескровный В.М. и др. (СССР). № 2926211 / 29 – 33; Заявлено 13.05.80; Опубл. 23.09.82. Бюл. № 35. 1982. 118 с.

менее допустимой по расчету величины. А при строительстве и эксплуатации таких дорожных одежд необходимо учитывать их естественную склонность к растрескиванию.

Для уменьшения объемного трещинообразования в покрытии между пакетом асфальтобетонных слоев и основанием, укрепленным с использованием неорганических вяжущих, допускается устраивать дисперсную трещинопрерывающую прослойку из прочного щебня крупностью не более 20 мм. В обоснованных случаях для регулирования шага поперечных трещин допускается устраивать в монолитных слоях основания деформационные швы или укладывать в нижней части пакета асфальтобетонных слоев армирующую сетку²³. Кроме того, принимаются меры по улучшению деформативных свойств цементогрунта путем введения эластомеров (полимерные добавки, ренолит, латекс с лигносульфонатами, смолы, битумы, эмульсии т.п.). Полимер-цементогрунтовые смеси применяются в более чем 30 странах мира.

Другим недостатком монолитных оснований, по мнению А.М. Кулижникова, характерным для западных районов Европейской части Российской Федерации, где наблюдаются в зимний период частные переходы температуры воздуха через 0 градусов, на поверхности прочных водонепроницаемых монолитных слоев будут скапливаться поверхностные воды, поступающие через температурные трещины асфальтобетонного покрытия. В результате скопления воды в трещинах между покрытием и основанием в процессе морозного воздействия не исключено их преждевременное раскрытие и разрушение покрытий дорожных одежд. Так, например, в Финляндии предпочтение отдано дренирующим основаниям из щебеночно-песчаных смесей, отводящих поверхностные воды. Безусловно, данное мнение требует проведения дополнительных исследований в специфических условиях частого перехода температуры воздуха через 0 градусов.

Чтобы выделить специфический подкласс нежестких дорожных одежд с монолитными слоями оснований и отличить его от класса

дорожных одежд жесткого типа (имеющих слои покрытия или основания из еще более прочного и жесткого бетона), канд. техн. наук Н.Н. Беляев (ФАУ «РОСДОРНИИ») предлагает, с известной долей условности, обозначить этот тип дорожных одежд как «полужесткие дорожные одежды» [14]. Этим термином («полужесткие») уже обозначались слои дорожной одежды из укрепленных минеральными вяжущими грунтов и каменных материалов в работах проф. В.М. Безрука, опубликованных в 70-е годы прошлого века²⁴.

Таким образом, под дорожной одеждой полужесткого типа будет подразумеваться нежесткая дорожная одежда с асфальтобетонным покрытием, в которой с целью повышения прочности и термоустойчивости несущие слои основания устраиваются монолитными, из каменных материалов или грунтов, обработанных неорганическими вяжущими (в том числе и в комплексе с органическими). Дополнительным преимуществом дорожных одежд полужесткого типа является их более высокая устойчивость к образованию колеи от воздействия колес автомобилей, обусловленной накоплением остаточных деформаций в слоях основания дорожной одежды.

В РФ отсутствует единый отраслевой нормативный документ, в котором бы в комплексе рассматривались вопросы проектирования, строительства и эксплуатации дорожных одежд полужесткого типа с учетом их специфики, разработка такого документа в настоящее время весьма актуальна [14].

В соответствии с ПНСТ 542–2021 (п.п 6.11.2), на дорогах с капитальным типом дорожных одежд под слоями из асфальтобетона целесообразно устраивать слой основания преимущественно из материалов, укрепленных неорганическими, органическими и комплексными вяжущими²⁵. В соответствии с рекомендациями ПНСТ 542-2021²⁴ «под слоем основания из укрепленных материалов рекомендуется устраивать основание из ЩПС или ЩГПС, а также из фракционированного щебня, устраиваемого по способу заклинки» с какой целью дана данная рекомендация не ясно. Также считаем упущением данного до-

²³ ОДМ 218.3.119–2019 Методические рекомендации по применению нежестких дорожных одежд с основаниями из укрепленных или обработанных вяжущими каменных материалов и грунтов: дата введения 2020-06-08. М.: Росавтодор, 2022. 99 с.

²⁴ Безрук В.М. Укрепление грунтов в дорожном и аэродромном строительстве. М.: Транспорт, 1971. 247 с.

²⁵ ПНСТ 542–2021 Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования (с Поправками): дата введения 2021-06-01. М: Стандартинформ, 2021. 90 с.

кумента отсутствие рекомендации применять монолитные основания при устройстве дорожных одежд облегченного типа.

Такой подход к проектированию дорожных одежд нежесткого типа не учитывает все достоинства монолитных конструктивных слоев, ограничивает область их применения и не рационален с экономической точки зрения. Многолетний положительный опыт строительства сотен километров дорог I–IV категорий с монолитными основаниями и покрытиями переходного типа представлен в работах²⁶ [15].

В России построено и эксплуатируется свыше 30 тыс. км дорог с основаниями из укрепленных грунтов (в основном цементогрунты). Эти работы выполнялись в 60–80 г. прошлого столетия. В настоящее время возникла острая необходимость возобновить широкое использование незаслуженно забытого метода укрепления грунтов при строительстве и реконструкции дорог.

Основания из материалов, укрепленных вяжущими, не только прочны и долговечны, но и экономичны, поскольку открывают возможность использовать местные грунты, некондиционные каменные материалы и промышленные отходы взамен дорогостоящих привозных материалов.

Применение отходов промышленности при строительстве монолитных оснований и покрытий

В России промышленные отходы образуются в количестве примерно 2,6–3,0 млрд т в год. Более 90% этого объема составляют отходы добычи и обогащения полезных ископаемых, которые являются неисчерпаемыми источниками сырья, в том числе для дорожной отрасли. Однако они используются лишь на 6–7%. Установлено, что использование крупнотоннажных промышленных отходов позволяет покрыть до 40% потребности страны в сырьевых ресурсах, на 10–30% снизить затраты на изготовление строительных материалов по сравнению с производством их из природного сырья и существенно улучшить экологическую обстановку. Одной из причин, сдерживающих более широкое применение отходов промышленности, является факт необоснованного повышения отпускной цены на отходы по инициативе руководителей промышленных пред-

приятий по мере повышения спроса на эти отходы и этот вопрос необходимо решать на государственном уровне.

В настоящее время для дорожной отрасли разработан и испытан целый ряд составов геополлимерных вяжущих и модифицированных золошлаковых вяжущих с активностью более 100 МПа. Особый интерес представляют отходы (полупродукты), которые без дополнительной переработки обладают вяжущими свойствами и могут быть использованы для устройства монолитных конструктивных слоев дорожных одежд. Рассмотрим это направление на примере белитовых шламов, многотоннажных отходов глиноземного производства, которые без дополнительного измельчения, за счет высокого содержания белита, обладают свойствами медленнотвердеющих вяжущих.

Белитовые шламы образуются при производстве глинозема – оксида алюминия (исходного материала для получения алюминия электролитическим методом) 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 -двухкальциевый силикат (белит). Из продукта спекания путем гидротермального выщелачивания выделяют глинозем, а белит (C_2S практически полностью оставаясь в шламе, в виде пескообразного отхода с модулем крупности 1,0–2,2 поступает в отвал²⁷.

В зависимости от вида перерабатываемой руды натуральный белитовый шлам подразделяют на нефелиновый и бокситовый.

По фазовому составу нефелиновый шлам представляет в основном смесь силикатов, гидросиликатов (20–30%) и гидроалюминатов кальция (3–5%), гидроферритов, карбонатов. Содержание C_2S в нефелиновом шламе составляет 70–85%. Бокситовый шлам состоит из C_2S (40–55%), кальцита, магнетита, гематита, гидрограната, гиббсита, перовскита, кварцита.

Следовательно, шламы являются полимерными материалами, в которых четко фиксируется преобладающее наличие белита β -полиморфной формы, сцементированного массой

²⁶ Белоусов Б.В., Гаврилов А.Н., Афонин А.С. Предложения по конструированию дорожных одежд с повышенным сроком службы. Мир дорог. М.: 2016. 2 с.

²⁷ Логинова И.В., Кырчиков А.В. Аппаратурно-технологические схемы в производстве глинозема // Екатеринбург: Урфу, 2011. 233 с.

гидратов. Бокситовый шлам отличается от нефелинового меньшим содержанием белита, оксидов кальция и кремния и повышенным содержанием оксидов железа.

Производителями белитового шлама в России являются крупнейший в мире Ачинский глиноземный комбинат (АО «РУСАЛ Ачинск»), Волховский алюминиевый завод, ООО «Пикалевский глиноземный завод». Запасы этого отхода на шламоотвалах предприятий исчисляются сотнями миллионов тонн. На основании заключения ФГУ «ЦЭКА» по определению класса опасности отходов расчетным методом нефелиновый шлам отнесен к 5-му классу опасности (неопасные отходы).

Еще в 70–80 годы прошлого столетия омские ученые из «СоюзДорНИИ» и СибАДИ выполнили фундаментальные исследования по теоретическому обоснованию возможности и целесообразности использования нефелинового шлама (АО «РУСАЛ Ачинск») и бокситового шлама Павлодарского алюминиевого завода при строительстве, ремонте и эксплуатации дорог и аэродромов. В настоящее время работы в развитие данного направления в современных экономических условиях продолжены на кафедре «Строительство и эксплуатация дорог» ФГБОУ ВО «СибАДИ».

Установлено, что натуральный белитовый шлам текущего производства (без дополнительного измельчения), уплотненный при оптимальной влажности (22–26%), по показателям прочности, при сроке твердения 90 сут соответствует маркам от М40 до М60²⁸. При этом сохраняется тенденция к дальнейшему

набору прочности за счет большого резерва негидратированного вяжущего [16]. Шлам текущего производства обладает рядом уникальных специфических свойств:

- является готовым грубодисперсным, бесклнкерным, частично гидратированным, медленноотвердеющим вяжущим обладающим способностью в момент уплотнения во влажном состоянии превращаться в монолитный водостойкий материал и увеличивать свою прочность в течение многих лет;

- имеет пониженную температуру начала замерзания минус 2 °С и хорошую уплотняемость в интервале отрицательных температур (минус 3 – минус 7 °С), низкую теплопроводность и теплоемкость, что обусловлено пористой (пемзообразной) структурой его зерен, в результате выщелачивания из них оксида алюминия;

- затвердевший шлам способен восстанавливать разрушенную структуру после повторного уплотнения, то есть обладает тиксотропными свойствами;

- длительное время сохраняет удобоукладываемость в технологическом процессе по устройству конструктивных слоев при отрицательных температурах воздуха.

Результаты детального исследования физических, физико-химических и физико-механических свойств этих шламов представлены в следующих работах^{29,30} [15, 16, 17, 18].

На основании многолетних научных исследований и производственного внедрения были разработаны методические рекомендации, определяющие область применения шлама^{31,32,33,34}

²⁸ 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. М., 1990. 18 с.

²⁹ Белоусов Б.В., Гаврилов А.Н., Афонин А.С. Предложения по конструированию дорожных одежд с повышенным сроком службы. Мир дорог. М.: 2016. 2 с.

³⁰ 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. М.: 1990. 18 с.

³¹ Методические рекомендации по укреплению грунтов и других материалов медленноотвердеющими вяжущими при пониженных положительных и отрицательных температурах / Минтрансстрой СССР. М.: Союздорнии, 1985. 33 с.

³² Методические рекомендации по устройству дорожных оснований и переходных покрытий с применением белитового шлама в нефтегазоносных районах Западной Сибири/ Минтрансстрой СССР. М.: Союздорнии, 1986. 28 с.

³³ ВСН 84–89 Изыскания, проектирование и строительство автомобильных дорог в районах распространения вечной мерзлоты. М.: Минтрансстрой, 1990. 271 с.

³⁴ 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. М. 66 с.

и национальные стандарты, регламентирующие применение белитового шлама^{35,36,37}.

Натуральный белитовый шлам как текущее производство, так и лежалый может быть использован в дорожном строительстве во всех дорожно-климатических зонах, при любых типах местности по условиям увлажнения в качестве:

- материала для устройства монолитных оснований под асфальтобетонные и цементобетонные покрытия;
- вяжущего для обработки щебеночных (гравийных) оснований способом пропитки (вдавливания);
- материала для устройства шламощебеночных покрытий переходного типа;
- вяжущего для укрепления грунтов, не кондиционных каменных материалов и асфальтового гранулята;
- активной добавки при укреплении каменных материалов и грунтов традиционными минеральными и органическими вяжущими;
- основного компонента вяжущего для изготовления силикатобетонных дорожных плит;
- монтажных слоев под сборные покрытия;
- морозозащитных слоев дорожных одежд;
- теплоизолирующих слоев (коэффициент теплопроводности шлама в 2–2,2 раза ниже чем у песка с влажностью 20%);
- технологических прослоек в земляном полотне;
- укрепления обочин.

Следует отметить, что строительство конструктивных слоев дорожных одежд из натурального белитового шлама и шламощебеночных материалов могут устраиваться, в том числе в зимний период, при температурах воздуха до минус 20°C³⁸ [15, 16, 17]. При этом с годами отмечается тенденция к постоянному

медленному набору прочности. Например, модуль

упругости основания из рядового бокситового шлама, построенного в Омской области в зимний

период на автомобильной дороге «Подъезд к заводу костной муки», через 33 года эксплуатации увеличился в 2,9 раза³⁹.

С целью уменьшения дозировок при укреплении грунтов и каменных материалов, шлам также может быть использован в качестве главного компонента безобжиговых комплексных вяжущих с активностью 100–200 МПа, полученных путем его высушивания и совместного помола с активаторами: портландцементом, клинкером, гипсом, известью, цементной пылью и т.д.⁴⁰ Такие вяжущие имеют существенные технологические и конструктивные преимущества по сравнению с портландцементом и другими традиционными минеральными вяжущими, так как не имеют четко выраженных сроков начала и конца схватывания и обеспечивают медленное повышение прочности слоя по мере увеличения интенсивности движения в процессе эксплуатации дороги [19].

По разработанным рекомендациям с применением белитового шлама построены сотни километров дорог общего пользования I–IV категорий и нефтепромысловых дорог в I, II, III и IV дорожно-климатических зонах, Красноярском крае, Омской, Новосибирской, Тюменской, Томской и Павлодарской областях⁴¹ [15, 19].

С учетом особой актуальности проблемы освоения Крайнего Севера и нефтегазоносных районов Сибири, отличающихся суровым климатом и заболоченностью территории где, как правило, нет возможности обеспечить объезд строящегося участка дороги, рассмотрим более подробно результаты исследований по со-

³⁵ 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 «РСТ», 2022. 12 с.

³⁶ ГОСТ Р 70452–2022. Дороги автомобильные общего пользования. Грунты стабилизированные и укрепленные неорганическими вяжущими. Общие технические условия: дата введения 2023-01-01. М.: ФГБУ «РСТ», 2022. 20 с.

³⁷ 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 «РСТ», 2022. 14 с.

³⁸ 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. М., 1990. 18 с.

³⁹ Белоусов Б.В., Гаврилов А.Н., Афонин А.С. Предложения по конструированию дорожных одежд с повышенным сроком службы. Мир дорог. М.: 2016. 2 с.

⁴⁰ Бескровный В.М. Применение нефелинового шлама для строительства оснований автомобильных дорог в условиях Сибири: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 1983. 221 с.

⁴¹ Белоусов Б.В., Гаврилов А.Н., Афонин А.С. Предложения по конструированию дорожных одежд с повышенным сроком службы. Мир дорог. М.: 2016. 2 с.

вершенствованию конструкций и технологий строительства промышленных дорог.

Проектная конструкция дорожных одежд промышленных дорог в Тюменской и Томской областях, как правило, представляет собой покрытие шириной 4 м из железобетонных плит ПАГ-14, уложенных на нетканый синтетический материал. Укрепление обочин предусматривается выполнять песчано-гравийной смесью толщиной 12 см.

Характерной особенностью строительства дорог в нефтепромысловых районах в основном на болотах I–III типов глубиной от 1,5 до 5 м и более, широко применяется двухстадийный метод устройства сборных покрытий. При двухстадийном строительстве на первой стадии плиты укладываются на земляное полотно, стыковые соединения не сваривают, швы не заполняют, обочины и откосы не укрепляют; на второй стадии производят перекладку плит с заменой дефектных. По нормативам допускается замена всего 5% от общего количества плит, прослуживших на первой стадии. Как показывает многолетний опыт строительства, в результате укладки плит непосредственно на не консолидированное земляное полотно замене подлежат 20–50% плит. Преждевременное разрушение плит приводит к значительным дополнительным затратам и снижению темпов строительства дорог. Кроме того, из-за неравномерных просадок плит проезд по дороге возможен с невысокой скоростью 15–30 километров в час, что отрицательно влияет на условия эксплуатации нефтяных месторождений.

Одним из путей решения данной проблемы может быть замена сборных покрытий на первой стадии строительства на покрытия переходного типа из материалов, свойства которых позволяют открывать движение транспорта

сразу после их укладки и сохранять несущую способность до полной консолидации земляного полотна, например белитовых шламов [16]. На второй стадии переходные покрытия могут служить основаниями под сборные покрытия. Такой подход позволяет исключить работу плит в не расчетный период и тем самым предотвратить их массовое разрушение.

С учетом того, что материал переходных покрытий должен обладать необходимой сдвигоустойчивостью уже в момент уплотнения, наиболее целесообразно использовать шлам в комплексе со щебнем. С целью разработки рациональных составов шламощебеночных материалов были проведены лабораторные исследования по изучению их физико-химических и физико-механических свойств и опытно-экспериментальное строительство по отработке наиболее эффективных методов устройства переходных покрытий при строительстве нефтепромысловых дорог на севере Тюменской и Томской области^{42, 43}.

С целью изучения влияния вида заполнителя на процессы структурообразования шламощебеночных материалов для сравнения провели исследования, по укреплению гранитного щебня фракций 0–15 мм и щебня из активного доменного шлака Западно-Сибирского металлургического завода (ЗСМЗ) 15% нефелинового шлака АО «РУСАЛ Ачинск»⁴⁴. Образцы диаметром и высотой 7 см формовали из смесей оптимальной влажности прессованием под нагрузкой 15 МПа. Образцы хранили в нормальных условиях и испытывали в возрасте 1, 3, 6 и 9 месяцев на сжатие и раскол (R_p), с целью определения предела прочности на растяжение при изгибе ($R_{изг} = 2R_p$). На рисунке 1 приведены результаты испытания образцов.

⁴² Совершенствование конструкций и технологии строительства дорожных одежд нефтепромысловых дорог со слоями из белитового шлама, а также укрепленных им местных материалов и отходов промышленности в условиях Западной Сибири (заключ.) / Омский Союздорнии: Руководитель А.А. Лыткин – ХОЗ – ДО – 86/87; № ГР 01860049691. Омск, 1987. 97 с.

⁴³ Опытное применение белитовых шламов и металлургических шлаков для устройства покрытий нефтепромысловых дорог в условиях Западной Сибири (заключ.) / Омский Союздорнии: руководитель Б.В. Белоусов – Д – ДО – 88-80-2/6-ОФ; № ГР 01880043347. Омск, 1989. 32 с.

⁴⁴ Лыткин А.А. Применение белитового шлака для устройства слоев дорожных одежд при отрицательных температурах: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05. 23. 11 / А.А. Лыткин. М., 1990. 18 с.

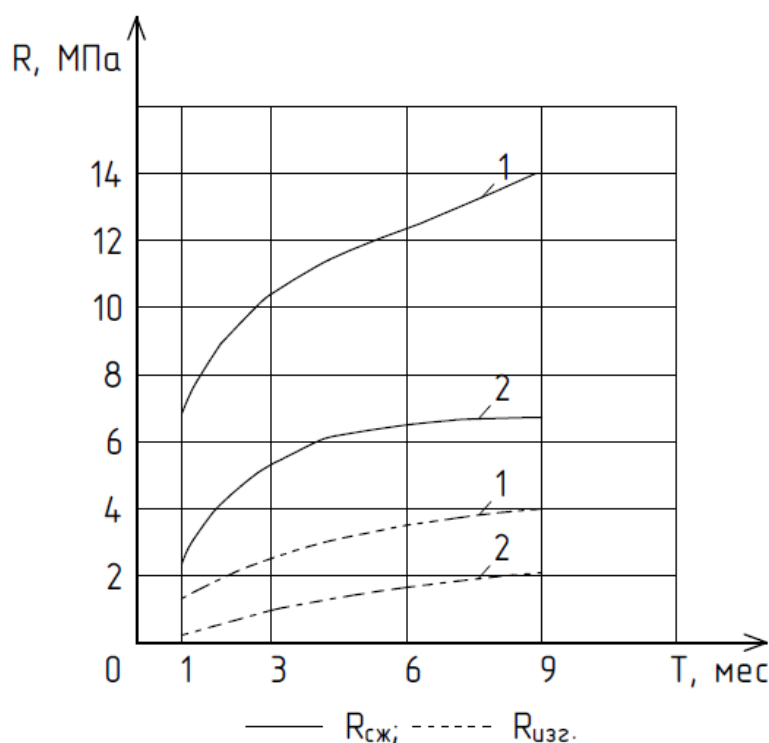


Рисунок 1 – Кинетика твердения образцов из шлакового и гранитного щебня, укрепленных нефелиновым шламом:
1 – шлаковый щебень, укрепленный шламом;
2 – гранитный щебень, укрепленный шламом
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Kinetics of hardening of samples made of slag crushed stone and granite crushed stone, strengthened with nepheline sludge
1 – slag crushed stone strengthened with sludge
2 – granite crushed stone reinforced with sludge
Source: compiled by the authors.

Данные рисунка 1 показывают, что показатели прочности образцов из шламошлаковых смесей при сжатии и растяжении при изгибе в 2–2,5 раза выше образцов из смесей на гранитном щебне. Кроме того, у шлакошламовых образцов больше значение $R_{изг}/R_{сж}$ (0,24 против 0,18), что свидетельствует о более высокой деформативности шлакошламового материала. Это объясняется активированием шлака водорастворимыми щелочами, входящими в состав шлама⁴⁵. Аналогичный принцип положен в основу производства шлакощелочных вяжущих. Следовательно, применение активных заполнителей вместо неактивных позволит получить более экономичные конструктивные слои за счет уменьшения дози-

ровки вяжущего (шлама) или уменьшения толщины слоя.

С целью определения оптимальных дозировок шлама для укрепления шлакового щебня по аналогичной методике формовали образцы с содержанием шлама: 5, 10, 20, 30% и шлаковом щебне без шлама. Образцы испытывали на сжатие и раскол сразу после изготовления и затем через 1, 3, 6, 9 и 12 месяцев твердения в нормальных условиях. На рисунках 2 и 3 приведены результаты испытания образцов.

Приведенные данные свидетельствуют о высокой эффективности применения шлакового щебня в комплексе с натуральным белитовым шламом.

⁴⁵ Логинова И.В., Кырчиков А.В. Аппаратурно-технологические схемы в производстве глинозема // Екатеринбург: Урфу, 2011. 233 с.

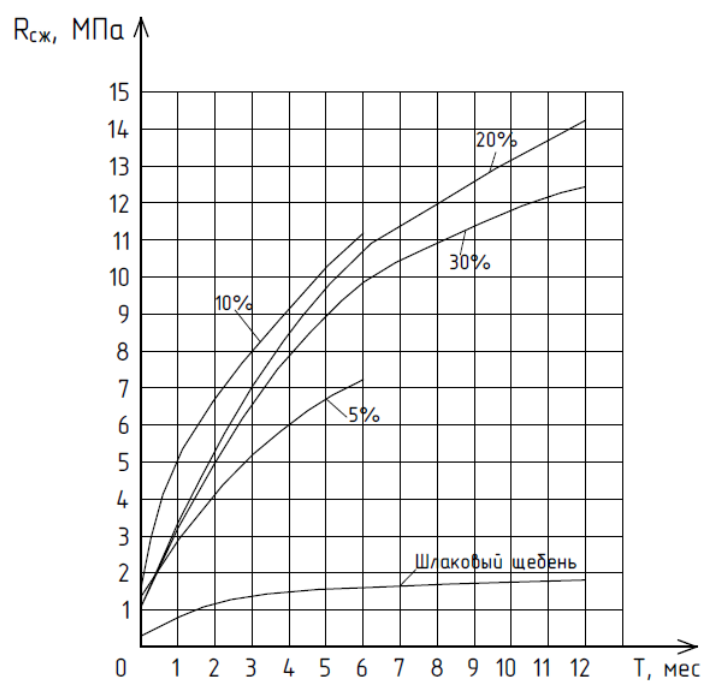


Рисунок 2 – Изменение во времени предела прочности на сжатие образцов из шлака и шлакошламовых смесей
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Change in time of the limit compressive strength of samples made of slag and slag sludge mixtures
Source: compiled by the authors.

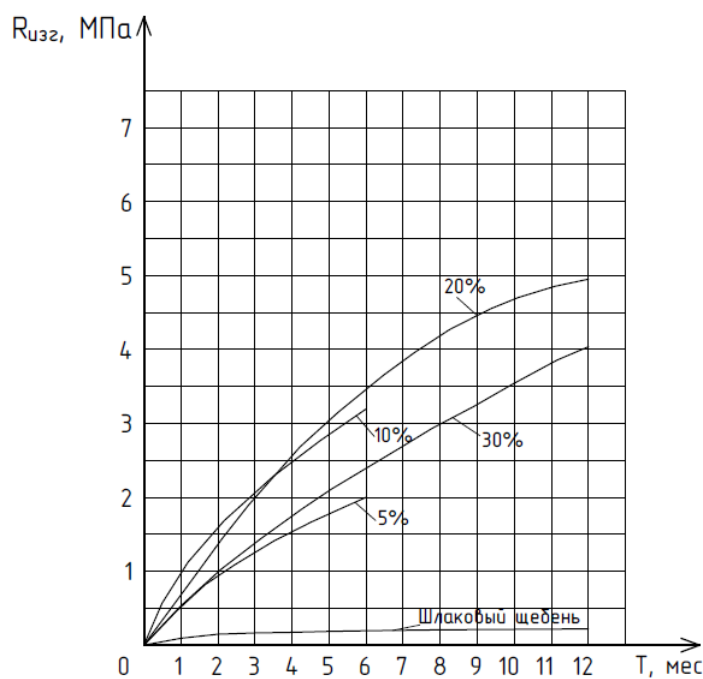


Рисунок 3 – Изменение во времени предела прочности на растяжение при изгибе образцов из шлака и шлакошламовых смесей
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Change in time of the tensile strength during bending of samples made of slag and slag sludge mixtures
Source: compiled by the authors.

Даже при 5% дозировке шлама в смеси прочность при сжатии образцов в трехмесячном возрасте составляет 5,3 МПа (см. рисунок 2), а предел прочности растяжение при изгибе 1,3 МПа (см. рисунок 3), что соответствует марке М40 А⁴⁶.

Следует отметить, что для всех исследуемых составов шламошлаковых смесей характерен интенсивный набор прочности на протяжении всего наблюдаемого периода – 12 месяцев, что объясняется большим резервом в белитовом шламе и активном шлаке негидратированного вяжущего [16]. Результаты многолетних наблюдений показывают, что набор прочности белитового (нефелинового, бокситового) шламов и шламощебеночных материалов в конструктивных слоях дорог продолжается десятилетиями⁴⁷.

Для укрепления щебня данного фракционного состава оптимальная дозировка шлама составляет 15–20%. При такой дозировке к 12 месяцам материал набирает прочность при сжатии 14 МПа, а при изгибе 4,9 МПа, что соответствует прочности тощего бетона класса В10 (М150) повышенной деформативности ($R_{изг}/R_{сж} = 0,35$)⁴⁸.

В целом можно заключить, что применение белитовых шламов в комплексе с активным шлаковым щебнем при дозировке шлама 5–30% позволит получать материал М40 – М60 марок по прочности. В производственных условиях составы должны уточняться с учетом фактических свойств используемых материалов (гранулометрический состав каменного материала, активность шлама, применяемые механизмы для производства работ, логистика поставки материалов и т.д.).

С целью отработки технологии устройства шламошлаковых покрытий был выполнен большой объем опытно-экспериментальных работ. Рассмотрим производственный опыт на примере строительства нефтепромысловых дорог во II дорожно-климатической зоне

на севере Томской области (нефтяные месторождения Оленье и Ломовое).

В опытном строительстве использовался бокситовый шлам Павлодарского алюминиевого завода (ПАЗ), доменный шлак Западно-Сибирского комбината (ЗСМК) и песчано-гравийная смесь (ПГС) Томского островного месторождения с содержанием зерен гравия около 45%. Следует отметить, что производственники (трест «Казнефтедорстрой»), в силу организационных причин не смогли обеспечить поставку на объекты качественного шлакового щебня, отвечающего требованиям ГОСТ 3344–83⁴⁹. В шлаке содержалось около 20% фракций крупнее 120 мм, что отрицательно влияло на качество и производительность работ по устройству шламощебеночных покрытий. С учетом реальной обстановки были приложены все усилия для извлечения максимума данных из опытного строительства на имеющихся в наличии материалах. В процессе строительства крупные куски шлака приходилось удалять с помощью погрузчиков и вручную, что повышало трудоемкость работ и приводило к перерасходу материала.

Для определения физико-механических свойств шламошлакового материала из шлака фракций 0–20 мм (70%) и бокситового шлама (30%) были изготовлены образцы цилиндры диаметром и высотой 10,1 см. Результаты испытания образцов, твердевших в нормальных условиях, представлены в таблице 1.

Данные таблицы 1 показывают, что при обработке шлака, отвечающего нормативным требованиям бокситовым шламом, можно получать материал марки М20. Следует отметить, что при использовании в качестве вяжущего нефелинового шлама прочностные показатели материала были значительно выше, что объясняется более высокой активностью нефелинового шлама за счет большего содержания в его составе белита (70–85% против 40–55%)⁵⁰.

⁴⁶ 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 «РСТ», 2022. 14 с.

⁴⁷ Белоусов Б.В., Гаврилов А.Н., Афонин А.С. Предложения по конструированию дорожных одежд с повышенным сроком службы. Мир дорог. М.: 2016. 2 с.

⁴⁸ Методические рекомендации по применению технологичных конструкций нежестких дорожных одежд с основанием из тощего бетона: дата введения 1986-01-01. М.: Государственный всесоюзный дорожный научно-исследовательский институт, 1986. 17 с.

⁴⁹ ГОСТ 3344–83 Щебень и песок шлаковые для дорожного строительства. Технические условия: дата введения 1985-01-01. М.: Стандартиформ, 2007. 11 с.

⁵⁰ 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. М., 1990. 18 с.

Таблица 1

Показатели физико-механических свойств образцов из шлакошламового материала

Источник: составлено авторами.

Table 1

Indicators of physical and mechanical properties of samples made of slag sludge material

Source: compiled by the authors.

| Возраст образцов | Влажность, % | Плотность, г/см ³ | | Прочность, МПа | |
|------------------|--------------|------------------------------|----------|----------------|------------|
| | | ρ_w | ρ_d | при сжатии | при изгибе |
| 28 | 9,8 | 2,11 | 1,93 | 1,23 | – |
| 90 | 10,3 | 2,12 | 1,93 | 2,42 | 0,32 |

Металлургический шлак, бокситовый шлам и песчано-гравийная смесь доставлялись речным транспортом до речного причала в селе Александровское и далее автотранспортом на расстояние 275 км в притрассовые штабели.

В период с 1986 по 1988 год было построено 10 опытных участков на внутри промысловых дорогах IV-П категории общей протяженностью 11 км 665 м на болотах I–III типов. Опытные участки представляли собой покрытия переходного типа серповидного профиля.

Участки отличались:

- конструкцией покрытия (ПГС обработанная 30% шлама толщиной 23–25 см; слой шлама с защитным слоем из шлака общей толщиной 22–24 см; слой шлака, укрепленный в верхней части шламом общей толщиной 20–22 см и 15–17 см; шлак, обработанный 30% шлама толщиной 20–22 см);

- технологией строительства (смешение материалов на дороге автогрейдером или смесительным оборудованием по а. с. № 905348⁵¹; обработка шлакового слоя шламом не на полную глубину методом вдавливания с помощью пневмокатка ДУ-16В или виброкатка А-12);

- основанием, подстилающим земляное полотно (минеральные грунты и болота различного типа глубиной до 4,2 м).

Кроме того, строительство участка протяженностью 600 м на дороге «Подъезд к кусту 15» (II секция) выполнялось в октябре месяце при отрицательных температурах воздуха минус 5–7 °С. С учетом того, что свойства шлама (уплотняемость в интервале отрицательных

температур, низкая теплопроводность и т.д.) позволяют качественно выполнять работы с его применением при температурах до минус 20 °С, затруднений в процессе строительства опытного участка не отмечалось⁵²[15]. Шлам был удобоукладываемый в процессе всех технологических операций по устройству покрытия.

К сожалению, из-за отсутствия фракционного щебня не удалось применить высокоэффективный способ устройства покрытий (оснований), в котором пропитку (вдавливание) шлама в слой щебня производят кулачковым катком ДУ-26, что позволяет не только увеличить толщину обрабатываемого слоя до 17 см, но и регулировать ее числом проходов катка по одному следу. Характеристики опытных участков представлены в таблице 2.

Установлено, что для обработки слоя шлама шламом методом вдавливания предпочтение следует отдавать вибрационному катку, при этом достигается лучшая ровность и требуется меньшее число проходов катка (5–6 проходов против 15–16). При обработке шлама и ПГС со шламом способом смешения целесообразнее использовать смесительное оборудование по а.с. 905348⁵³. При этом ориентировочное число проходов по одному следу составляет 3–4 и качество перемешивания шламошлакового материала получается значительно лучше, чем при использовании автогрейдера.

Обследование опытных конструкций после 1–3 лет эксплуатации на первой стадии строительства выполняли в 1988 и 1989 годах в расчетный период.

⁵¹ А.С. № 905348, СССР Е 01 С 19/15. Дорожное навесное оборудование / Ю.М. Зуналу и др. (СССР) – 2872655/29-33; Заявлено 21.01.80; опубл. Бюл. № 6. 1982. 136 с.

⁵² 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. М., 1990. 18 с.

⁵³ А.С. № 905348, СССР Е 01 С 19/15. Дорожное навесное оборудование / Ю.М. Зуналу и др. (СССР) – 2872655/29-33; Заявлено 21.01.80; опубл. Бюл. № 6. 1982. 136 с.

Таблица 2
Характеристика опытных участков
Источник: составлено авторами.

Table 2
Characteristics of the experimental sections
Source: compiled by the authors.

| Наименование дороги | Протяженность участка, м | Год и месяц стр-ва | Технология стр-ва | Уплотняющая техника | Использованные материалы |
|-------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--|------------------------|------------------------------|
| Подъезд к кусту 24 | 425 | 1986, июнь | Смешение на дороге автогрейдером | Пневмокоток ДУ-16В | ПГС+30% шлама ПАЗ |
| Подъезд к кусту 15 | | | | | |
| – секция 1 | 600 | 1986, июнь-июль | Смешение на дороге автогрейдером, обработка вдавливанием | Пневмокоток ДУ-16В | Шлак 3СМК, шлам ПАЗ |
| – секция 2 | 600 | 1986, октябрь | | | |
| Подъезд к кусту 12 | 3730 | 1986, сентябрь – 5 октября | Обработка вдавливанием | Пневмокоток ДУ-16В | Шлак 3СМК, шлам ПАЗ |
| Подъезд к кусту 10 | 580 | 1987, июль – август | | | |
| Подъезд к кусту 9 | 1900 | 1987, август – сентябрь | | Виброкоток А-22 | |
| Подъезд к кусту 8 | 1530 | 1987, сентябрь | | | |
| Подъезд к кустам 2-3 | 1800 | 1987, июль – август | | | |
| Подъезд к кусту 22 | 500 | 1988, август | Смешение на дороге смесителем поа.с. №905348 | Пневмокоток ДУ-16В | Шлак 3СМК + 30% шлама ПАЗ |

Обследование включало оценку общего состояния покрытий и определение общих модулей упругости с помощью рычажного прогибомера МАДИ-ЦНИЛ и груженого расчетного автомобиля МАЗ-500А. Результаты определения общих модулей упругости представлены в таблице 3.

В процессе обследования установлено, что на всех опытных участках материал покрытий, даже после первого года эксплуатации, сформировался в монолит. Не смотря на тяжелые условия эксплуатации дорог (пропуск гусеничной техники, буровые вышки массой в десятки тонн транспортируются волоком и т.д.) с течением времени происходит постепенное увеличение прочности покрытий на всех участках.

Например, на «Подъезде к кусту 10», где толщина покрытия минимальная (15–17 см), уже через год эксплуатации общий модуль упругости превысил требуемый (135 МПа против 125 МПа), а через два года он составлял 170 МПа, что в 1,3 раза выше требуемого.

Это связано, прежде всего, со специфическими свойствами бокситового шлама, представляющего собой предварительно гидратированное грубодисперсное, медленно-вердеющее вяжущее (C₂S 40–55%)^{54,55,56}.

Для устройства покрытий переходного типа из ПГС, обработанной 30% бокситового шлама, рекомендуется назначать толщину слоя не менее 25 см, а при обработке шлакового материала не менее 17 см.

⁵⁴ 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. М., 1990. 18 с.

⁵⁵ Белоусов Б.В., Гаврилов А.Н, Афонин А.С. Предложения по конструированию дорожных одежд с повышенным сроком службы. Мир дорог. М., 2016. 2 с.

⁵⁶ Логинова И.В.,Кырчиков А.В. Аппаратурно-технологические схемы в производстве глинозема // Екати́ренбург: Урфу, 2011. 233 с.

Таблица 3

Результаты определений общих модулей упругости на опытных участках

Источник: составлено авторами.

Table 3

Results of determination of total elastic moduli on experimental sections

Source: compiled by the authors.

| Наименование дороги | Толщина покрытия, см | Общий модуль упругости E_r , МПа | | | |
|------------------------|-------------------------|------------------------------------|-------------|--------------|--------------|
| | | Требуемый | Фактический | | |
| | | | через 1 год | через 2 года | через 3 года |
| Подъезд к кусту 24 | 23–25 | 125 | – | – | 190 |
| Подъезд к кусту 15 | 20–22 | 180 | – | 155 | 185 |
| Подъезд к кусту 12 | 20–22 | 125 | – | 155 | 180 |
| Подъезд к кусту 10 | 15–17 | 125 | 135 | 170 | – |
| Подъезд к кусту 9 | 20–22 | 125 | 115 | 176 | – |
| Подъезд к кусту 8 | 20–22 | 125 | – | 155 | – |
| Подъезд к кусту 2-3 | 20–22 | 125 | – | 165 | – |
| Подъезд к кусту 22 | 20–22 | 150 | 145 | – | – |

Для обеспечения качества и темпов строительства необходимо использовать шлаковый щебень, отвечающий нормативным требованиям⁵⁷. Дозировки шлама для укрепления шлакового щебня должны уточняться в зависимости от конкретных условий строительства, наличия дорожно-строительной техники, свойств исходных материалов и схем их поставки.

Результаты проведенных исследований использованы при разработке методических рекомендаций по устройству дорожных оснований и переходных покрытий с применением белитового шлама в нефтегазоносных районах Западной Сибири⁵⁸.

Реализация данных рекомендаций позволяет экономить до 300 шт. железобетонных плит типа ПАГ-14, до 5 тыс. м² нетканного синтетического материала и до 670 м³ ПГС при строительстве 1 км дороги.

Продолжение работ в этом направлении позволило проанализировать результаты многолетних наблюдений объектов, построенных с применением белитовых шламов для уточ-

нения расчетных параметров его способности к самоупрочнению⁵⁹. Авторским коллективом института ООО «ОмскийСоюзДорНИИ» под руководством Б.В. Белоусова разработан ОДМ 218.3.043–2015, в котором приведены нормативные параметры активности белитовых шламов и расчетные характеристики материалов, им укрепленных⁶⁰. Кроме того, была впервые нормативно закреплена в качестве рекомендательной новая расчетная характеристика расчета дорожных одежд – коэффициент самоупрочнения.

Важнейшим направлением по повышению межремонтных сроков дорог с дорожными одеждами нежесткого типа является выбор технологии их ремонта. В виду стереотипности мышления заказчиков и проектировщиков и при разработке проектов капитального ремонта предпочтение, как правило, отдается традиционным технологиям, включающим предварительное выравнивание старого покрытия фрезерованием с последующим устройством одного или двух слоев из асфальтобетонных смесей. Однако общеизвестно, что наиболее

⁵⁷ ГОСТ 32826–2014 Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и песок шлаковые. Технические требования (с Поправками, с Изменением N 1): дата введения 2015-07-01. М.: Стандартинформ, 2019. 12 с.

⁵⁸ Методические рекомендации по устройству дорожных оснований и переходных покрытий с применением белитового шлама в нефтегазоносных районах Западной Сибири/ Минтрансстрой СССР. М.: Союздорнии, 1986. 28 с.

⁵⁹ Белоусов Б.В., Гаврилов А.Н., Афонин А.С. Предложения по конструированию дорожных одежд с повышенным сроком службы. Мир дорог. М., 2016. 2 с.

⁶⁰ 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. М. 66 с.

ответственным конструктивным слоем, обеспечивающим несущую способность, является основание, а оно, как отмечалось ранее, состоит из дисперсных материалов, значительно утративших в процессе эксплуатации прочностные показатели. Фактически происходящее с течением времени снижение прочности таких оснований является совместным результатом многократных приложений нагрузок от транспорта и воздействия природных факторов. В результате происходит постепенное измельчение минеральных материалов, увеличивается содержание мелких частиц, растет площадь их поверхности и подвижность. Интенсивность измельчения можно характеризовать содержанием образующихся частиц мелкозема (мельче 0,25 мм) или песчано-пылевато-глинистых частиц (мельче 5 мм). Количество этих частиц может возрастать ежегодно на 0,3–3%. Например, при реконструкции автомобильной дороги Москва-Харьков после снятия дорожного покрытия выяснилось, что щебеночное основание представляло собой пластическую вязкую не просыхающую массу продуктов измельчения щебня с небольшим количеством сохранившихся отдельных твердых зерен.

Эффективной технологией восстановления несущей способности слоев щебеночных (гравийных) оснований и усиления дорожных одежд нежесткого типа в сравнении с традиционными методами ремонта является «Метод холодной регенерации» (ресайклинг)^{61,62} [20, 21, 22]. Данная технология предусматривает выполнение регенерации старых слоев покрытия или основания с максимальным использованием материала старого асфальтобетона как основного компонента нового. В этом случае специальные машины – ресайклеры измельчают материал существующего покрытия, превращая его в асфальтобетонный гранулят с одновременным перемешиванием его с вяжущим (цементом, битумом, битумной эмульсией и др.) и последующим распределением слоем с заданными поперечными уклонами.

При холодном ресайклинге достигается значительная экономия кондиционных дорож-

но-строительных материалов и исключаются затраты на утилизацию материала старого покрытия. Кроме того, разрушение старого покрытия позволяет ликвидировать источник возникновения отраженных трещин на новом покрытии. Укрепление асфальтового гранулята обеспечивает усиление дорожной одежды за счет получения дополнительного однородного, монолитного слоя основания из асфальтогранулобетона. При этом общий модуль упругости дорожной одежды повышается в 1,5–2 раза, что обеспечивает значительное увеличение ресурса дорожной одежды по критерию упругого прогиба и увеличить срок службы дороги между капитальными ремонтами.

Следовательно, решение о выборе технологии ремонта каждой дороги должны приниматься на профессиональном уровне и на основании результатов диагностики.

Но следует отметить, что, например, метод укрепления гранулята цементом не лишен недостатков. Во-первых, цемент представляет собой дорогой материал. Во-вторых, вследствие того, что цемент является высокоактивным быстросхватывающимся и быстротвердеющим вяжущим, технологические операции по устройству конструктивных слоев с его применением должны быть выполнены в очень сжатые сроки (не более двух часов между приготовлением смеси и окончанием ее уплотнения). Во-вторых, асфальтогранулобетон на основе цемента имеет излишне высокую жесткость, в результате чего в процессе эксплуатации в основании могут образовываться температурные трещины, которые неизбежно отражаются в вышележащих асфальтобетонных слоях. Кроме того, устройство монолитных оснований и покрытий из асфальтогранулобетона с применением вяжущих допускается при температурах воздуха не ниже 10 °С. Сезонный характер устройства таких оснований существенно сдерживает темпы ремонта дорог.

Устранить данные недостатки можно, заменив портландцемент медленнотвердеющими бесклинкерными вяжущими, не имеющими ярко выраженного срока схватывания: сланцевые золы-уноса, активированные известью;

⁶¹ 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.

⁶² Баранов И.А., Дерли О.А. Отечественные и зарубежные инновационные технологии в дорожном строительстве // Безопасный и комфортный город: Сборник научных трудов по материалам V международной научно-практической конференции, Орел, 6–8 июня 2022 года. Орел: Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, 2022. С. 146–149. EDN CIZLGP.

тонкомолотые фосфорные шлаки, активированные известью или цементной пылью; белитовые шламы [19]. Кроме того, у медленноотвердеющих вяжущих тиксотропная коагуляционная структура сохраняется в течение более длительного времени по сравнению с портландцементом. Это позволяет 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 уплотнения.

С учетом специфических, уникальных свойств белитовых шламов, как отмечалось ранее, в 2018 г. ФГБОУ ВО «СибАДИ», совместно с ООО «Стройсервис» были выполнены исследования по применению нефелинового шлама АО «РУСАЛ Ачинск» в качестве минерального вяжущего при укреплении асфальтового гранулята по технологии холодного ресайклинга. Шлам в количестве 60 т был доставлен из г. Ачинска в г. Омск железнодорожным транспортом.

Цель исследований: изучение эффективности использования нефелинового шлама для укрепления асфальтового гранулята, в том числе при отрицательных температурах воздуха. Исследования включали лабораторные работы по изучению кинетики твердения шламогранулобетона и опытно экспериментального строительства.

Для повышения активности шлама и снижения его дозировок при укреплении гранулята был произведен его помол на валковой мельнице по производству минерального порошка М 138.

Для изучения кинетики твердения шламогранулобетона из асфальтового гранулята, укрепленного молотым шламом, изготавливались цилиндрические образцы диаметром 71,4 мм прессованием под давлением 7 МПа по стандартной методике⁶³. Серии образцов отличались дозировкой молотого шлама 10% и 15% и условиями их хранения. Образцы хранили при следующих температурных режи-

мах: в нормальных условиях в климатической камере при температуре $20 \pm 0,5$ °C и в естественных условиях (на открытом воздухе) в ящике с песком, для моделирования температурного режима твердения материала в основании дорожной одежды. Испытания образцов осуществляли в возрасте 7, 28, 90, 180 и 360 сут при температурах 20 °C и 50 °C.

Результаты испытания образцов на сжатие (R) при температуре 20 °C показали, что даже в возрасте 7 сут при хранении как в нормальных, так и в естественных условиях, при дозировке шлама 15% шламогранулобетон набрал прочность, соответствующую нормативным требованиям $R_{20} = 2,6$ МПа (норматив – не менее 2,0 МПа)⁶⁴. После 28 сут твердения и при 10% дозировке вяжущего материал достиг нормативного минимума, а при 15% показатели значительно выше – 2,9 МПа. В возрасте 90 сут R 20 составила 2,4 МПа и 4,0 МПа при дозировках шлама 10% и 15% соответственно. При хранении образцов как в нормальных, так и естественных условиях в течение 180 и 360 сут тоже наблюдается устойчивый рост прочностных показателей. Показатели R_{50} в возрасте 7 сут 0,76–1,26 МПа также соответствуют нормативным требованиям (0,8 МПа для дорог I–II и 0,7 МПа для III категорий) и продолжают увеличиваться во времени, что характерно для медленноотвердеющих вяжущих⁶⁵.

Строительство опытного участка выполняли в III дорожно-климатической зоне на территории г. Омска (проспект Губкина) силами дорожно-строительной организации ООО «Стройсервис» в сентябре 2018 г. Опытный участок состоял из двух секций, каждая площадью 300 м². Секции отличались дозировкой шлама в шламогранулобетоне: 10% и 15% (аналогично дозировкам в лабораторных исследованиях). Для выполнения холодного ресайклинга использовался ресайклер WR 4200 в комплексе с суспензатором WM1000. Толщина регенерированного слоя составляла 20 см. После прохода ресайклера смесь уплотняли отрядом катков – грунтовый HAMM 3516 массой 14 т за 8 проходов по одному следу, из них

⁶³ Методические рекомендации по восстановлению асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог способами холодной регенерации: дата введения 2002-06-27. М.: Росавтодор, 2002. 58 с.

⁶⁴ 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.

⁶⁵ 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. М., 1990. 18 с.

4 с вибрацией, и пневмоколесный HAMMGRW 280-10 массой 10 т за 6 проходов в статическом режиме. После уплотнения по основанию осуществлялся проезд транспорта с ограничением его скорости до 30 км/час. Через 3 сут основание из шламогранулобетона перекрыли двумя слоями асфальтобетона общей толщиной 9 см. В течение следующих двух лет эксплуатации дороги опытный участок детально обследовался с отбором и испытанием кернов шламогранулобетона. Предел прочности при сжатии шламогранулята с 10% шлама через год составила 2,1 МПа, через 2 года 2,7 МПа, а при 15% шлама 2,3 МПа и 3,0 МПа соответственно.

Более подробно результаты лабораторных исследований и опытного строительства изложены в работе [19].

С учетом того, что асфальтогранулобетон как при лабораторных испытаниях, так и в основании дорожной одежды сформировался в прочный монолит, отвечающий по прочностным показателям нормативным требованиям, можно сделать вывод о целесообразности использования молотого нефелинового шлама АО «РУСАЛ Ачинск» в качестве вяжущего для укрепления асфальтового гранулята по технологии холодный ресайклинг, в том числе при низких, до 0 °С, температурах воздуха, без введения специальных противоморозных добавок. Время на выполнение технологических операций по уплотнению основания и устройству слоя покрытия не регламентируется. После уплотнения по основанию допускается проезд транспортных средств, с регулированием движения по всей ширине слоя и ограничением скорости до 30 км/час, что способствует повышению темпов ремонтных работ.

Исследовательские работы по расширению области применения белитовых шламов продолжаются на кафедре «Строительство и эксплуатация дорог ФГБОУ ВО «СибАДИ».

Направление дальнейших исследований:

- разработка рациональной схемы поставки нефелинового шлама АО «РУСАЛ Ачинск», в том числе в Омскую область;
- разработка составов безобжиговых медленнотвердеющих вяжущих (двух-трех-компонентных) с заданной тонкостью помола (с целью регулирования резерва не гидратированных реагентов), в том числе комплексных

геополимерных вяжущих на основе отходов промышленности;

- разработка технологии холодного ресайклинга асфальтобетонных покрытий с заменой традиционных вяжущих на рядовой белитовый шлам и специально приготовленные медленнотвердеющие шламоминеральные вяжущие, в том числе при отрицательных температурах воздуха;

- разработка технологии строительства оснований и покрытий низшего типа из грунтов, укрепленных шламом и шламоминеральными вяжущими, в том числе в зимний период;

- разработка нормативного документа, регламентирующего применение рядового шлама и медленнотвердеющих шламоминеральных вяжущих при восстановлении слоев оснований методом холодной регенерации;

- разработка нормативного документа, регламентирующего применение рядового шлама и медленнотвердеющих шламоминеральных вяжущих при устройстве слоев основания дорожных одежд.

Широкое применение белитового шлама позволит значительно продлить дорожно-строительный сезон, сократить дефицит каменных материалов и традиционных вяжущих, снизить материалоемкость дорожных одежд, повысить их несущую способность и долговечность, а также решить ряд экологических проблем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен комплекс мероприятий по увеличению межремонтных сроков эксплуатации дорог с дорожными одеждами нежесткого типа.

Для решения задачи увеличения межремонтных сроков необходимо обеспечить на вновь строящихся или капитально ремонтируемых дорожных конструкциях значительное повышение общего модуля упругости. И начинать необходимо с ужесточения требований к минимальным значениям модулей упругости на поверхности земляного полотна. В настоящее время в целях повышения сроков службы и снижения затрат на устройство дорогостоящей дорожной одежды требования к модулю упругости на поверхности рабочего слоя земляного полотна, в соответствии с ПНСТ 542–2021⁶⁶, повышены в зависимости от ДКЗ. Для достижения настоящих требований рекомен-

⁶⁶ ПНСТ 542–2021 Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования (с Поправками): дата введения 2021-06-01. М.: Стандартинформ, 2021. 90 с.

дуются укрепление грунта верхней части рабочего слоя вяжущими, местными материалами или стабилизация грунта.

Одним из эффективных путей продления межремонтных сроков является замена оснований дорожных одежд из дисперсных материалов на монолитные. Особый эффект при этом достигается при использовании отходов промышленности, обладающих самостоятельными вяжущими свойствами. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена эффективность устройства монолитных слоев дорожных одежд из белитового шлама и шламощебеночных материалов. Особый эффект при этом достигается при использовании в качестве заполнителя активного доменного шлака (показатели прочности образцов из шламошлаковых смесей при сжатии и растяжении при изгибе в 2–2,5 раза выше, чем у образцов из аналогичных смесей на гранитном щебне).

На основании теоретических исследований и опытно-экспериментальных работ разработаны рекомендации по совершенствованию конструкций и технологий устройства монолитных покрытий переходного типа с применением шламошлаковых материалов на первой стадии строительства нефтепромысловых дорог в заболоченных районах Сибири.

Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена эффективность и целесообразность использования молотого белитового шлама взамен цемента при ремонте асфальтобетонных покрытий методом холодного ресайклинга, в том числе при пониженных температурах воздуха, без введения противоморозных добавок.

Необходимо пересмотреть отдельные положения действующих нормативных документов на предмет возвращения в них некоторых эффективных, проверенных временем, технологий и материалов, которые были безосновательно исключены в процессе актуализации.

Кроме того, необходимо продолжить исследования по разработке комплексных медленнотвердеющих безобжиговых, в том числе геополлимерных вяжущих на основе отходов промышленности специально для укрепления грунтов и каменных материалов с разработкой нормативных документов, отвечающих требованиям ТР ТС 014/2011⁶⁷.

Следовательно, увеличение срока службы дорожных одежд нежесткого типа в принципе вполне возможно, но требует внедрения инновационных конструктивных решений на стадии проектирования, строительства, реконструкции и ремонта с использованием высокоэффективных материалов и технологий с целью увеличением прочности и долговечности дорожных конструкций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Красиков О.А., Косенко И.Н. Межремонтные сроки службы нежестких дорожных одежд и покрытий // *Дороги и мосты*. 2019. № 1(41). С. 92–108. EDN NNKBQD.
2. Золотарев В.А. Концепция вечных дорожных одежд // *Автомобильные дороги*. 2013. № 2. С. 60–63.
3. Радовский Б.С. Концепция вечных дорожных одежд // *Дорожная техника*. 2011. № 11. С. 132–144.
4. Яромко В.Н., Ахмедов К.И. К вопросу проектирования долговечных дорожных одежд // *Автомобильные дороги и мосты*. 2017. №1 (19). С. 14–19.
5. Кулижников А.М. Пути увеличения межремонтных сроков службы автомобильных дорог // *Транспорт Российской Федерации*. 2018. № 2(75). С. 46–50. EDN YXNLNY.
6. Кулижников А.М. Требования к деформационным характеристикам рабочего слоя земляного полотна // *Дороги и мосты*. 2017. № 37/1. С. 81–92.
7. Окольников Г.Э., Симоненко Ю.Ю. Химическая стабилизация пучинистых грунтов // *Системные технологии*. 2023. № 2(47). С. 178–181. DOI 10.55287/22275398_2023_2_178. EDN LKORZW.
8. Jassim N.W., Hassan H.A., Mohammed H.A., Fattah M.Y. Utilization of waste marble powder as sustainable stabilization materials for subgrade layer // *Results in Engineering*. 2022. Vol. 14. P. 100436. DOI 10.1016/j.rineng.2022.100436. – EDN NIYIOI.
9. Ojuri O.O., Ramdas V., Aderibigbe E.A. [et al.] Improving strength and hydraulic characteristics of regional clayey soils using biopolymers // *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 17. P. e01319. DOI 10.1016/j.cscm.2022.e01319. EDN MJNZNQ.
10. Opukumo A.W., Davie C.T., Glendinning S., Oborie E. A review of the identification methods and types of collapsible soils // *Journal of Engineering and Applied Science*. 2022. Vol. 69, No. 1. P. 1–21. DOI 10.1186/s44147-021-00064-2. EDN DSVANX.
11. Tan E.H., Zahran E.M.M., Tan S.J. A comparative experimental investigation into the chemical stabilisation of sandstone aggregates using cement and styrene-butadiene copolymer latex for road sub-base construction // *Transportation*

⁶⁷ ТР ТС 014/2011 Технический регламент Таможенного союза «Безопасность автомобильных дорог» (с изменениями на 9 декабря 2011 года). Электрон.дан. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200133426> (дата обращения: 21.11.2023).

Geotechnics. 2022. Vol. 37. P. 100864. DOI 10.1016/j.trgeo.2022.100864. EDN EKVALW.

12. Yang B., Li H., Li H. [et al.] Experimental investigation on the mechanical and hydraulic properties of urease stabilized fine sand for fully permeable pavement // *International Journal of Transportation Science and Technology*. 2022. Vol. 11, No. 1. P. 60–71. DOI 10.1016/j.ijtst.2020.12.002. EDN GAHXFI.

13. Bieliatynskyi A., Yang Sh., Krayushkina K. [et al.] Study of the possibility of using phosphorous slags in road construction // *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2022. Vol. 36. P. 101262. DOI 10.1016/j.jestch.2022.101262. EDN MNNGDV.

14. Беляев Н.Н. Полужесткие дорожные одежды // *Автомобильные дороги*. 2017. № 12. С. 48–51.

15. Лыткин А.А. Опыт строительства монолитных слоев дорожных одежд при отрицательных температурах воздуха // *Вестник СибАДИ*. 2022; 19(3): 422–435. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-422-435>

16. Лыткин А.А. Влияние повторного уплотнения и транспортных нагрузок на характер твердения белитового шлама в слоях дорожных одежд // *Вестник СибАДИ*. 2017; (3(55)): 125–132. [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-3\(55\)-125-132](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-3(55)-125-132)

17. Lytkin A.A. Study of the Transport Loads Influence on the Nature of Belite Sludge Hardening in Pavement. *MaterialsScienceForum* 992. 2020. pp. 79–85. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.992.79.

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

19. 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; 17(6): 764–776. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-764-776>.

20. Chegenizadeh A., Tufilli A., Arumdani I.S. [et al.] Mechanical Properties of Cold Mix Asphalt (CMA) Mixed with Recycled Asphalt Pavement // *Infrastructures*. 2022. Vol. 7, No. 4. P. 45. DOI 10.3390/infrastructures7040045. EDN MWE GTX.

21. Kim Ye., Lee S. Experiments and numerical analysis of cold-recycled asphalt mixture modified with desulfurization gypsum additive // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 326. P. 126803. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2022.126803. EDN RQBUUS.

22. Wang D., Chang H., Cai Y. [et al.] Performance and assessment of modified cold recycled asphalt emulsion mixture // *Road Materials and Pavement Design*. 2023. Vol. 24, No. 10. P. 2425–2447. DOI 10.1080/14680629.2022.2148183. EDN TUIXPK.

REFERENCES

1. Krasikov O.A., Kosenko I.N. Inter-repair service life of non-rigid road pavements and pavements. *Dorogi i mosty*. 2019; 1(41): 92–108. – EDN NNKBQD. (in Russ.)

2. Zolotarev V.A. Concept of eternal road pavements. *Avtomobil'nye dorogi*. 2013; 2: 60–63. (in Russ.)

3. Radovskij B.S. Concept of eternal road pavements. *Dorozhnaya tekhnika*. 2011; 11: 132–144. (in Russ.)

4. Jaromko V.N., Ahmedov K.I. On the issue of designing long-term road pavements. *Avtomobil'nye dorogi i mosty*. 2017; 1 (19): 14–19. (in Russ.)

5. Kulizhnikov A.M. Ways to increase the inter-repair service life of highways. *Transport Rossijskoj Federacii*. 2018; 2(75): 46–50. EDN YXNLNY. (in Russ.)

6. Kulizhnikov A.M. Requirements for deformation characteristics of the working layer of the roadbed. *Dorogi i mosty*. 2017; 37/1: 81–92. (in Russ.)

7. Okol'nikova G.E., Simonenko E.Yu. Chemical stabilization of expansive soils. *System technologies*. 2023; 2(47): 178–181. DOI 10.55287/22275398_2023_2_178. EDN LKORZW. (in Russ.)

8. Jassim N.W., Hassan H.A., Mohammed H.A., Fattah M.Y. Utilization of waste marble powder as sustainable stabilization materials for subgrade layer. *Results in Engineering*. 2022; Vol. 14: 100436. DOI 10.1016/j.rineng.2022.100436. EDN NIYIOI.

9. Ojuri O.O., Ramdas V., Aderibigbe E.A. [et al.] Improving strength and hydraulic characteristics of regional clayey soils using biopolymers. *Case Studies in Construction Materials*. 2022; Vol. 17: e01319. DOI 10.1016/j.cscm.2022.e01319. – EDN MJNZNQ.

10. Opukumo A.W., Davie C.T., Glendinning S., Oborie E. A review of the identification methods and types of collapsible soils. *Journal of Engineering and Applied Science*. 2022; Vol. 69, No. 1: 1–21. DOI 10.1186/s44147-021-00064-2. EDN DSVAHX.

11. Tan E.H., Zahran E.M.M., Tan S.J. A comparative experimental investigation into the chemical stabilisation of sandstone aggregates using cement and styrene-butadiene copolymer latex for road sub-base construction. *Transportation Geotechnics*. 2022; Vol. 37: 100864. DOI 10.1016/j.trgeo.2022.100864. EDN EKVALW.

12. Yang B., Li H., Li H. [et al.] Experimental investigation on the mechanical and hydraulic properties of urease stabilized fine sand for fully permeable pavement. *International Journal of Transportation Science and Technology*. 2022; Vol. 11, No. 1: 60–71. DOI 10.1016/j.ijtst.2020.12.002. EDN GAHXFI.

13. Bieliatynskyi A., Yang Sh., Krayushkina K. [et al.] Study of the possibility of using phosphorous slags in road construction. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2022; Vol. 36: 101262. DOI 10.1016/j.jestch.2022.101262. EDN MNNGDV.

14. Beljaev, N.N. Semi-rigid road clothes. *Avtomobil'nye dorogi*. 2017; 12: 48–51. (in Russ.)

15. Lytkin A.A. Experience in construction of monolithic layers of road pavement at sub-zero air temperatures. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19(3): 422–435. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-422-435>

16. Lytkin A.A. Influence of repeated compaction and transport loads on the character of hardening of

belitic sludge in layers of road clothes. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017; (3(55)): 125–132. (In Russ.) [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-3\(55\)-125-132](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-3(55)-125-132)

17. Lytkin, A.A. Study of the Transport Loads Influence on the Nature of Belite Sludge Hardening in Pavement. *Materials Science Forum*. 992. 2020: 79–85. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.992.79.

18. Levin B.V., Lisyuk B.S., Lucenko K.L. Nepheline concentrates and sludges are unique raw materials for geopolymer materials and structures. *Mir dorog*. 2020; 129–130: 91–100. EDN FWCAHQ.

19. Lytkin A.A., Starkov G.B., Wagner E.Ya. Research of the efficiency of the use of belite sludge for the device of monolithic layers of road clothes by the method of cold recycling. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17(6): 764–776. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-764-776>

20. Chegenizadeh A., Tufilli A., Arumdani I.S. [et al.] Mechanical Properties of Cold Mix Asphalt (CMA) Mixed with Recycled Asphalt Pavement. *Infrastructures*. 2022. Vol. 7, No. 4. P. 45. DOI 10.3390/infrastructures7040045. EDN MWE GTX.

21. Kim Ye., Lee S. Experiments and numerical analysis of cold-recycled asphalt mixture modified with desulfurization gypsum additive. *Construction and Building Materials*. 2022; 326: 126803. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2022.126803. EDN RQBUUS.

22. Wang D., Chang H., Cai Y. [et al.] Performance and assessment of modified cold recycled asphalt emulsion mixture. *Road Materials and Pavement Design*. 2023; Vol. 24, No. 10: 2425–2447. DOI 10.1080/14680629.2022.2148183. EDN TUIXPK.

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. Оформление текста статьи, результатов исследования в графиках и таблицах.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

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

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

Aleksandr S. Prolygin. The article, research results in graphs and tables layout.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лыткин Александр Александрович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, доц. кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, 5), **ORCID:** 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 (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, 5), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7582-3939>, **SPIN-код:** 7079-8998, e-mail: dolgikh-gv@yandex.ru

Пролыгин Александр Сергеевич – аспирант кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, 5), **ORCID:** 0000-0002-1395-0553, **Scopus ID:** 57222243670, e-mail: aleksandrprolygin@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander A. Lytkin. Cand. of Sci., Senior Researcher, Associate Professor of the Roads Construction and Operation Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (644050, Omsk, Mira street, 5), **ORCID:** 0000-0002-5257-0502, **Scopus ID:** 57217279492, e-mail: alx.lytkin2016@yandex.ru

Gennady V. Dolgikh. Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Roads Construction and Operation Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (644050, Omsk, Mira street, 5), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7582-3939>, **SPIN-код:** 7079-8998, e-mail: dolgikh-gv@yandex.ru

Aleksandr S. Prolygin. Postgraduate student of the Roads Construction and Operation Department Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (644050, Omsk, Mira street, 5), **ORCID:** 0000-0002-1395-0553, **Scopus ID:** 57222243670, e-mail: aleksandrprolygin@mail.ru