

УДК 625.844

Мавлиев Ленар Фидаесович

кандидат технических наук, доцент

E-mail: lenarmavliev@yandex.ru

Вдовин Евгений Анатольевич

кандидат технических наук, доцент

E-mail: vdovin007@mail.ru

Коновалов Никита Витальевич

ассистент

E-mail: for.inf@mail.ru

Хузиахметова Карина Рустамовна

инженер

E-mail: karina261996@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Шарапова Нелли Булатовна

инженер дорожного отдела

E-mail: nelly.gerlinger@yandex.ru

ООО «Новый Град»

Адрес организации: 420030, Россия, г. Казань, ул. Набережная, д. 11, оф. 204

Разработка дорожно-строительного материала на основе обработанной цементом щебеночно-песчаной смеси оптимального гранулометрического состава

Аннотация

Постановка задачи. В ряде регионов отсутствуют запасы прочного щебня, замена которого при строительстве автомобильных дорог обработанными местными материалами (обработанная цементом щебеночно-песчаная смесь, щебеночно-песчано-цементная смесь, «тощий» бетон, укатываемый бетон) – одно из перспективных направлений интенсификации и снижения стоимости дорожного строительства. Поэтому целью данной работы явилось получение оптимальных составов дорожно-строительных материалов на основе цемента и местного минерального сырья, непригодного или ограниченного в применении при устройстве дорожных одежд.

Результаты. Проведен анализ отечественной и зарубежной литературы по применению обработанного минерального сырья при строительстве автомобильных дорог, определены свойства местного щебня, природного песка из отсеков дробления, а также установлены оптимальные составы обработанных материалов и возможность применения их в различных конструктивных слоях дорожных одежд.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в обосновании возможности применения непригодного или ограниченного в применении местного минерального сырья при получении обработанной цементом щебеночно-песчаной смеси оптимального гранулометрического состава. Разработаны дорожно-строительные материалы на основе местного минерального сырья марок по прочности М40, М60 и морозостойкости F25.

Ключевые слова: щебеночно-песчаная смесь оптимального состава, дорожная одежда, щебеночно-песчано-цементная смесь, укатываемый бетон, показатели стандартного уплотнения, физико-механические свойства.

Введение

В ряде регионов страны, в том числе в Республике Татарстан, отсутствуют запасы прочных каменных материалов. Замена привозного щебня при строительстве автомобильных дорог укрепленными грунтами и обработанными местными материалами – одно из перспективных направлений интенсификации и снижения стоимости дорожного строительства. Мировой и отечественный опыт позволяет сделать вывод об

эффективности и значительных преимуществах применения в конструкциях дорожных одежд местных укрепленных грунтов и обработанных материалов. Наиболее эффективно поддаются обработке вяжущим смеси из несвязных материалов с приданием им высокой прочности и морозостойкости. Известно, что при наличии несущего каркаса из щебенистых и песчаных частиц, заполнение пустот и укрепление возможно, как по принципу непрерывной, так и по принципу прерывистой гранулометрии.

Причинами, позволяющими повысить эффективность дорожного строительства с использованием обработанных местных материалов, являются: распространенность песков и щебней, непригодных или ограниченно пригодных для строительства автомобильных дорог; возможность получения материала с заранее заданными характеристиками, благодаря достаточно однородному составу и свойствам несвязных материалов по сравнению с глинистыми грунтами; доступность технологии обработки и наличие необходимой техники у большинства подрядных организаций.

Разработка эффективных материалов дорожных одежд автомобильных дорог из местных укрепленных грунтов и обработанных материалов позволит, наряду с техническими задачами, решить также приоритетные задачи по повышению транспортной доступности, социально-экономическому развитию, улучшению экологической ситуации и расширению номенклатуры сырьевой базы Республики Татарстан.

Обзор направлений исследований в области получения и применения обработанных цементом материалов

Разработка эффективных материалов для конструктивных слоев дорожных одежд на основе минерального сырья с использованием различных вяжущих и добавок является одним из перспективных направлений исследований в дорожном строительстве. Вопросам получения обработанных цементом щебеночно-песчаных смесей, «тощих» бетонов, укатываемых бетонов, посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых. На сегодняшний день среди исследований в этой области можно выделить следующие направления: модификация добавками [1-3], влияние свойств заполнителей [4], замена традиционных заполнителей и вяжущих [5-7], применение отходов в составе получаемых материалов [8, 9], зависимость «качественные характеристики – среда» [10, 11], влияние технологических факторов [12], эксплуатационные свойства [13-16]. Все представленные направления исследований важны для обобщения, систематизации и развития теоретических и практических основ получения и применения в дорожном строительстве искусственных цементосодержащих материалов с заранее заданными свойствами.

Ранее нами также были проведены исследования (Буланов П.Е., Мавлиев Л.Ф., Вдовин Е.А. Оптимизация состава щебеночно-песчаной смеси обработанной портландцементом в комплексе с пластифицирующей и гидрофобизирующей добавкой // Известия КГАСУ. 2015. № 2 (32). С. 300-305) и опытно-промышленное внедрение (Буланов П.Е., Мавлиев Л.Ф., Вдовин Е.А., Асадуллина А.Р., Гараева Ж.Б., Максимов В.Г. Опытно-промышленное внедрение щебеночно-песчаной смеси, обработанной портландцементом в комплексе с пластифицирующей и гидрофобизирующей добавкой при строительстве автомобильной дороги // Известия КГАСУ. 2015. № 4 (34). С. 346-351) обработанной цементом щебеночно-песчаной смеси, модифицированной комплексными добавками на основе поликарбоксилатных пластификаторов и кремнийорганических гидрофобизаторов, доказавшие техническую эффективность таких модификаторов. Практический интерес представляет изучение влияния вида и качества заполнителей на структуру и свойства получаемого обработанного материала.

Для обеспечения требуемой прочности и морозостойкости обработанного материала необходимо определить наиболее целесообразное соотношение компонентов смеси.

Основные этапы подбора составов смесей заключаются в следующем:

- определение основных характеристик исходных материалов и установление соответствия их свойств требованиям нормативной документации;
- приготовление смесей оптимального гранулометрического состава с различными расходами цемента с целью определения показателей стандартного уплотнения;
- изготовление образцов из полученных смесей (учитывая необходимую оптимальную влажность для получения максимальной плотности) с целью определения

необходимого количества цемента для получения обработанного материала требуемой марки по прочности и морозостойкости (в зависимости от области применения в конструкции дорожной одежды и погоднo-климатических условий района строительства);

- определение показателей физико-механических свойств и минимального количества вяжущего, обеспечивающего, требуемые для конструктивного слоя, показатели прочности и морозостойкости.

Исследование показателей стандартного уплотнения и физико-механических свойств обработанной цементом щебеночно-песчаной смеси

Для приготовления образцов обработанных материалов применялся портландцемент ЦЕМ I 42,5Н ЗАО «Ульяновскцемент». В качестве местных минеральных материалов исследованы природный песок карьера «Сабанче» Альметьевского района Республики Татарстан и щебень карьера «Багряж» Альметьевского района Республики Татарстан.

Проба природного песка относится к очень мелкому (табл. 1), не соответствует нормативным требованиям по содержанию пылевидных и глинистых частиц – 7,30 %. Максимальная плотность скелета составила 1,61 г/см³, оптимальная влажность – 13,4 %.

Таблица 1

Результат определения зернового состава и содержания пылевидных и глинистых частиц природного песка

Размер сит, мм	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,05	<0,05
Частный остаток, %	0	0	0,30	0,16	0,60	38,07	40,14	13,43	7,30
Полный остаток, %	0	0	0,30	0,46	1,06	39,13	79,27	92,70	100
Полные проходы, %	100	100	99,70	99,54	98,94	60,87	20,73	7,30	0

Щебень соответствует марке по дробимости М400, по морозостойкости F15, зерновой состав представлен в табл. 2.

Таблица 2

Результат определения зернового состава щебня

Размер сит, мм	20	15	12,5	10	5
Частный остаток, %	0,50	29,01	15,65	18,16	36,68
Полный остаток, %	0,50	29,51	45,16	63,32	100

Также испытана проба песка после дробления представленного щебня. Проба песка из отсеков дробления относится к очень крупному (табл. 3). Максимальная плотность скелета составила 1,59 г/см³, оптимальная влажность – 8,32 %.

Таблица 3

Результат определения зернового состава и содержания пылевидных и глинистых частиц песка из отсеков дробления

Размер сит, мм	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,05	<0,05
Частный остаток, %	0	0	71,73	19,29	4,98	2,07	1,03	0,74	0,16
Полный остаток, %	0	0	71,73	91,02	96,00	98,07	99,10	99,84	100
Полные проходы, %	100	100	28,27	8,98	4,00	1,93	0,90	0,16	0

На основе проведенных испытаний местного минерального сырья определено, что представленный природный песок в естественном виде непригоден для устройства дорожных одежд, а щебень имеет невысокую прочность, что ограничивает область его применения.

В ходе исследований определены показатели стандартного уплотнения и физико-механических свойств щебеночно-песчаных смесей, обработанных цементом при различном содержании заполнителя и вяжущего. Данные исследования не вошли в представленную статью и будут опубликованы отдельно.

На представленном этапе исследования для сокращения расхода цемента подобран оптимальный зерновой состав щебеночно-песчаной смеси по ГОСТ 23558. Оптимальный зерновой состав щебеночно-песчаной смеси был получен при смешении природного

песка, песка из отсевов дробления и щебня в соотношении 30/30/40. В результате получена смесь с максимальной крупностью зерен 20 мм (табл. 4).

Таблица 4

Зерновой состав подобранной оптимальной щебеночно-песчаной смеси

Размер сит, мм	20	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,05	<0,05
Частный остаток, %	0,20	25,13	14,67	21,61	5,94	1,67	12,05	12,35	3,55	1,93
Полный остаток, %	0,20	25,33	40,00	61,61	67,45	70,12	82,17	94,52	98,07	100

Портландцемент вводился в щебеночно-песчаную смесь в количестве 6, 8 и 10 % от массы смеси (далее щебеночно-песчано-цементная смесь – ЩПЦС).

Из рис. 1 видно, что при увеличении количества портландцемента от 6 % до 10 % плотность скелета ЩПЦС возрастает от 2,07 г/см³ до 2,19 г/см³ и оптимальная влажность уменьшается от 6,74 % до 5,47 %.

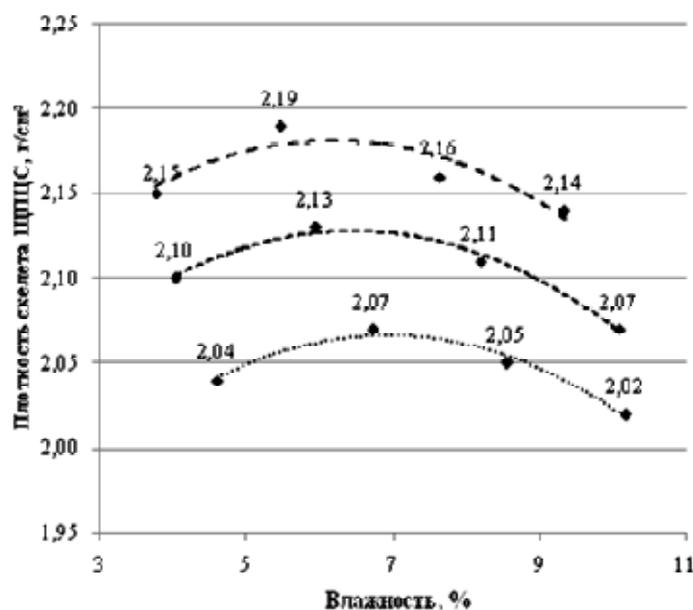


Рис. 1. Зависимость плотности ЩПЦС от влажности при различном содержании цемента (иллюстрация авторов):

..... 6 % --- 8 % ——— 10 %

Максимальная плотность скелета ЩПЦС содержащая 6 % цемента составила – 2,07 г/см³, 8 % – 2,13 г/см³, 10 % – 2,19 г/см³. Введение 6 % цемента способствовало достижению оптимальной влажности – 6,74 %, 8 % – 5,96 %, 10 % – 5,47 %.

После определения максимальной плотности и оптимальной влажности смесей, приготавливались образцы и испытывались по истечении 28 суток набора прочности.

Из рис. 2 видно, что при увеличении количества портландцемента от 6 % до 10 % прочность на сжатие возрастает от 5,09 до 8,57 МПа, прочность на растяжение при изгибе от 1,15 до 1,49 МПа, коэффициент морозостойкости от 0,83 до 0,94.

При введении 6 % цемента в состав смеси достигается марка по прочности М40 и морозостойкости F25, а при 8 % цемента – марка по прочности М60 и морозостойкости F25.

В результате исследований получены материалы марок по прочности М40, М60 и морозостойкости F25 (табл. 5).

Составы из подобранной оптимальной смеси природного песка (30 %), песка из отсевов дробления (30 %) и щебня (40 %), обработанного портландцементом (6 и 8 %), пригодны для оснований всех типов дорожных одежд и покрытий переходного типа в климатических условиях Республики Татарстан.

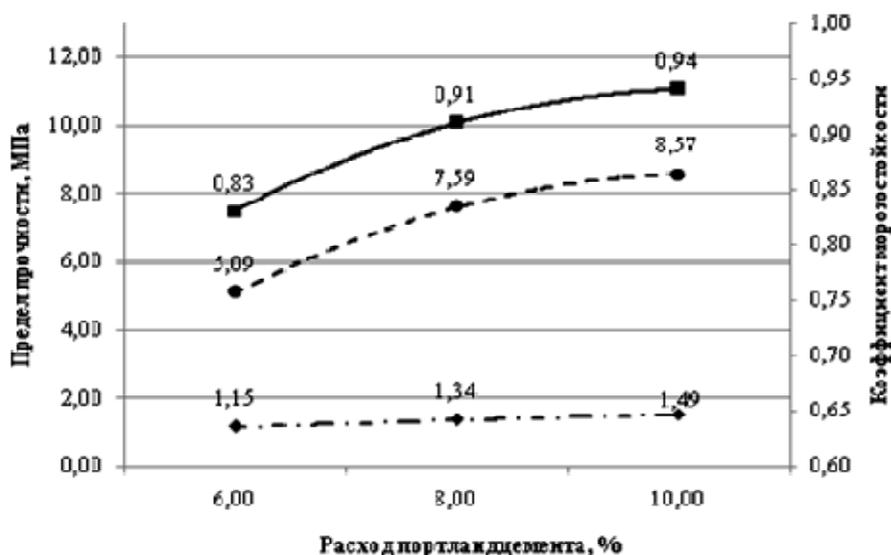


Рис. 2. Зависимость предела прочности на сжатие ($R_{сж}$), предела прочности на растяжение при изгибе ($R_{изг}$), коэффициента морозостойкости ($K_{мор}$) образцов ЩЩС от расхода цемента (в возрасте 28 сут.) (иллюстрация авторов):
 - - - - $R_{сж}$ - · - · - $R_{изг}$ — $K_{мор}$

Таблица 5

Характеристики разработанных составов ЩЩС и область их применения

№	Исходные материалы	Марка по прочности	Марка по морозостойкости	Тип дорожной одежды	Покрытие со слоем износа	Основание
А	Природный песок – 30 %; Песок из отсевов дробления – 30 %; Щебень – 40 %; Портландцемент – 6 %;	М40	F25	Капитальный	Не применяют	+
				Облегченный	Не применяют	+
				Переходный	+	+
Б	Природный песок – 30 %; Песок из отсевов дробления – 30 %; Щебень – 40 %; Портландцемент – 8 %;	М60	F25	Капитальный	Не применяют	+
				Облегченный	Не применяют	+
				Переходный	+	+

Для сравнительной оценки применения обработанных цементом местных материалов взамен привозных каменных запроектированы в соответствии с ПНСТ 265-2018 три варианта конструкций при равных условиях и нагрузках: I вариант – с основанием из обработанной цементом щебеночно-песчаной смеси М40, II вариант – с основанием из обработанной цементом щебеночно-песчаной смеси М60, III вариант – с основанием из трудноуплотняемого щебня. Конструкция для расчета дорожной одежды с представленными вариантами основания показана на рис. 3.

Конструктивные слои, удовлетворяющих критериям расчета дорожных одежд, для I варианта следующие:

- 1) ЩМА (щебеночно-мастичный асфальтобетон) с размером зерен 16 мм и более, на БНД 70/100 – 5 см;
- 2) АБ (асфальтобетон) ТР ТС с размером зерен 16 мм и более, на БНД 70/100 – 5 см;
- 3) АБ ТР ТС с размером зерен 22,4 мм и более, на БНД 70/100 – 7 см;
- 4) Щебеночно-песчаная смесь, обработанная цементом, М40 – 21 см;

- 5) Песок средней крупности – 30 см;
 Грунт земляного полотна – Легкий суглинок.

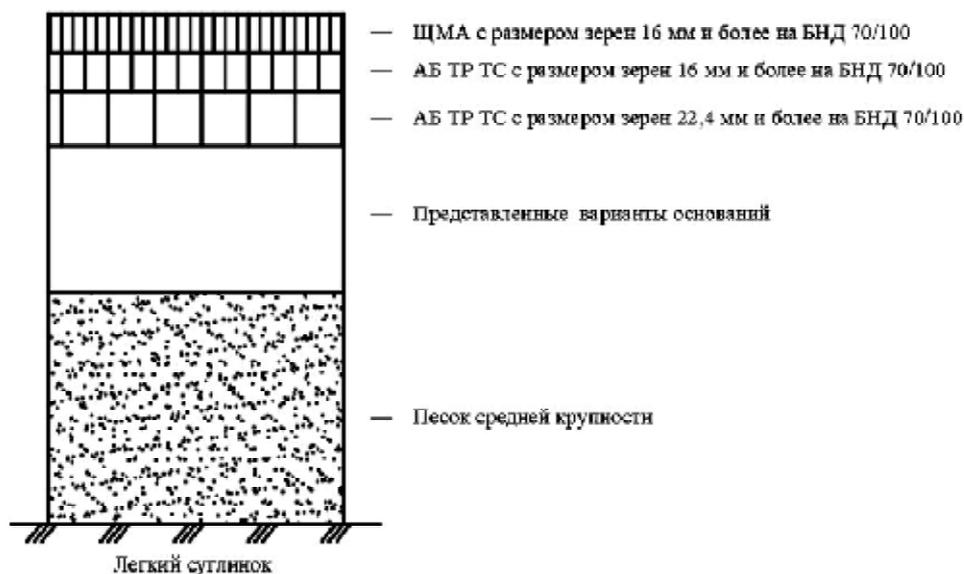


Рис. 3. Конструкция для расчета дорожной одежды с различными вариантами слоя основания (иллюстрация авторов)

Для II варианта в качестве 4 слоя принята также щебеночно-песчаная смесь, обработанная цементом, но соответствующая марке М60. Толщина слоя обработанного материала при этом составила 19 см, остальные слои остались без изменения.

По III варианту расчета изменения более значительны. Конструкция, удовлетворяющая критериям расчета, следующая:

- 1) ЩМА с размером зерен 16 мм и более, на БНД 70/100 – 5 см;
- 2) АБ ТР ТС с размером зерен 16 мм и более, на БНД 70/100 – 6 см;
- 3) АБ ТР ТС с размером зерен 22,4 мм и более, на БНД 70/100 – 10 см;
- 4) Щебень (трудноуплотняемый) фракции 31,5-63 мм, с заклиной фракционированным мелким щебнем – 30 см;
- 5) Песок средней крупности – 30 см.

Расчеты показали, что применение обработанной цементом щебеночно-песчаной смеси М60 вместо М40 позволяет незначительно снизить толщину данного слоя основания. Однако, при устройстве основания из щебня, увеличивается не только толщина данного слоя, но и толщины асфальтобетонных слоев. Одной из работ, планируемых в дальнейшем авторами, является сравнение стоимости устройства дорожной одежды с применением представленных материалов, а также материалов, модифицированных различными добавками.

Заключение

На сегодняшний день среди исследований в области получения и применения обработанных цементом материалов можно выделить следующие направления: модификация добавками, влияние свойств заполнителей, замена традиционных заполнителей и вяжущих, применение отходов в составе получаемых материалов, зависимость «качественные характеристики – среда», влияние технологических факторов, эксплуатационные свойства.

Получение щебеночно-песчаной смеси оптимального гранулометрического состава для дальнейшей обработки цементом является одним из возможных способов расширения области применения непригодного или ограниченного в применении местного минерального сырья. Разработаны дорожно-строительные материалы на основе местного минерального сырья марок по прочности М40, М60 и морозостойкости F25.

Список библиографических ссылок

1. Mohammed B. S., Adamu M. Non-destructive evaluation of nano silica-modified roller-compacted rubbercrete using combined SonReb and response surface methodology // *Road Materials and Pavement Design*. 2019. № 20 (4). P. 815–835.
2. Даваасенгэ С. С., Буренина О. Н. Физико-механические свойства наномодифицированных «тощих» бетонов для устройства оснований дорожной одежды // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2011. № 74. С. 62–73.
3. Сизонец С. В. Исследование ползучести образцов из «тощего бетона» с добавлением резиновой крошки // *Известия Ростовского государственного строительного университета*. 2010. Т. 1. № 14 (14). С. 312.
4. Hashemi M., Shafiq P., Abbasi M., Asadi I. The effect of using low fines content sand on the fresh and hardened properties of roller-compacted concrete pavement /Case Studies in Construction Materials. 2019. № 11. № 00230.
5. Olofinnade O. M., Ede A. N., Ndambuki J. M., Ngene B. U., Akinwumi I. I., Ofuyatan O. Strength and microstructure of eco-concrete produced using waste glass as partial and complete replacement for sand // *Cogent Engineering*. 2018. № 5 (1). P. 1–19.
6. Буренина О. Н., Давыдова Н. Н., Андреева А. В., Даваасенгэ С. С., Саввинова М. Е. Механоактивационные методы модификации «тощего» бетона с использованием лежалого цемента для устройства оснований дорожной одежды // *Естественные и технические науки*. 2015. № 11 (89). С. 604–608.
7. Rakhimov R. Z., Gayfullin A. R., Rakhimova N. R., Morozov V. P. Effect of the addition of thermally activated heavy loam to portland cement on the properties of cement stone // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2018. Т. 9. № 4. P. 679–686.
8. Khoury C., Acheampong K. B., Ofori-Awuah K. Mix Design of Roller Compacted Concrete Pavement Using Steel Slag By-Products // *Geotechnical Special Publication*. 2019. № 2019-March (GSP 310). P. 391-401.
9. Debbarma S., Ransinchung R. N. G. D., Singh S. Feasibility of roller compacted concrete pavement containing different fractions of reclaimed asphalt pavement // *Construction and Building Materials*. 2019. № 199. P. 508-525.
10. Kiza Rusati P., Song K.-I. Magnesium chloride and sulfate attacks on gravel-sand-cement-inorganic binder mixture // *Construction and Building Materials*. 2018. № 187. P. 565–571.
11. Матуа В. П., Сизонец С. В. Повышение морозостойкости укрепленных минеральными вяжущими щебеночно-песчаных смесей // *Инженерный вестник Дона*. 2012. № 4-1 (22). С. 164.
12. Şengün E., Alam B., Shabani R., Yaman I.O. The effects of compaction methods and mix parameters on the properties of roller compacted concrete mixtures // *Construction and Building Materials*. 2019. № 228. № 116807
13. Ren D., Song H., Huang C., Xiao C., Ai C. Comparative evaluation of asphalt pavement dynamic response with different bases under moving vehicular loading // *Journal of Testing and Evaluation*. 2020. № 48 (3). № JTE20190299.
14. Xu X., Yang J., Wu C., Zhang X. Dynamic response of roller-compacted concrete-base asphalt pavement // *CICTP 2019: Transportation in China-Connecting the World- Proceedings of the 19th COTA International Conference of Transportation Professionals*. 2020. P. 893–904.
15. Корочкин А. В. Влияние основания дорожной одежды из укатываемого (тощего) бетона на жесткость конструкции // *Транспортное строительство*. 2018. № 3. С. 18–21.
16. Матуа В. П., Сизонец С. В., Матуа Р. В. Исследование укрепленных щебеночно-песчаных смесей на накопление остаточных деформаций под воздействием динамических нагрузок // *Вестник ВГАСУ. Серия: Строительство и архитектура*. 2013. № 30 (49). С. 154–161.

Mavliev Lenar Fidaesovich

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: lenarmavliev@yandex.ru**Vdovin Evgeny Anatolyevich**

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: vdovin007@mail.ru**Konovalov Nikita Vitalievich**

assistant

E-mail: for.inf@mail.ru**Khuziahmetova Karina Rustamovna**

engineer

E-mail: karina261996@mail.ru**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya str., 1

Sharapova Nelli Bulatovna

road department engineer

E-mail: nelly.gerlinger@yandex.ru**LLC «Novy Grad»**

The organization address: 420030, Russia, Kazan, Naberezhnaya st., 11, of. 204

**Development of road-building material based on gravel-sand-cement mixture
with optimal granulometric composition****Abstract**

Problem statement. In many regions there are no stocks of strong crushed stone which replacement at construction of highways by the processed local materials (the gravel-sand mixture with cement, gravel-sand-cement mixture, «lean» concrete, roller-compacted concrete) – one of perspective directions of intensification and decrease in cost of road construction. Therefore, the purpose of this work was to obtain optimal compositions of road-building materials based on cement and local mineral raw materials, unsuitable or limited in use in the device of road surfaces.

Results. The analysis of domestic and foreign literature on the use of processed mineral raw materials in the construction of roads, the properties of local gravel, natural sand and sand from crushed gravel, as well as the optimal compositions of processed materials and the possibility of using them in various structural layers of road surfaces.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry is to justify the possibility of using unsuitable or limited in the use of local mineral raw materials in the preparation of gravel-sand-cement mixture of optimal granulometric composition. Road-building materials based on local mineral raw materials of M40, M60 and F25 strength grades have been developed.

Keywords: gravel-sand mixture of optimal composition, pavement, gravel-sand-cement mixture, roller-compacted concrete, indicators of standard compaction, physical and mechanical properties.

References

1. Mohammed B. S., Adamu M. Non-destructive evaluation of nano silica-modified roller-compacted rubbercrete using combined SonReb and response surface methodology // Road Materials and Pavement Design. 2019. № 20 (4). P. 815–835.
2. Davaasenge S. S., Burenina O. N. Physical and mechanical properties of nanomodified «lean» concretes for the device of bases of road clothes // Polymaticheskyy setevoy elektronnyy jurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2011. № 74. P. 62–73.

3. Sizonets S. V. Study of creep of samples of «lean concrete» with the addition of crumb rubber // *Izvestiya Rostovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta*. 2010. T. 1. № 14 (14). P. 312.
4. Hashemi M., Shafiq P., Abbasi M., Asadi I. The effect of using low fines content sand on the fresh and hardened properties of roller-compacted concrete pavement /Case Studies in Construction Materials. 2019. № 11. № 00230.
5. Olofinnade O. M., Ede A. N., Ndambuki J. M., Ngene B. U., Akinwumi I. I., Ofuyatan O. Strength and microstructure of eco-concrete produced using waste glass as partial and complete replacement for sand // *Cogent Engineering*. 2018. № 5 (1). P. 1–19.
6. Burenina O. N., Davydova N. N., Andreeva A. V., Davaasenga S. S., Savvinova M. E. Mechanoactivation methods of modification of «lean» concrete with the use of stale cement for the device of the bases of road clothes // *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2015. № 11 (89). P. 604–608.
7. Rakhimov R. Z., Gayfullin A. R., Rakhimova N. R., Morozov V. P. Effect of the addition of thermally activated heavy loam to portland cement on the properties of cement stone // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2018. T. 9. № 4. P. 679–686.
8. Khoury C., Acheampong K. B., Ofori-Awuah K. Mix Design of Roller Compacted Concrete Pavement Using Steel Slag By-Products // *Geotechnical Special Publication*. 2019. № 2019-March (GSP 310). P. 391–401.
9. Debbarma S., Ransinchung R. N. G. D., Singh S. Feasibility of roller compacted concrete pavement containing different fractions of reclaimed asphalt pavement // *Construction and Building Materials*. 2019. № 199. P. 508–525.
10. Kiza Rusati P., Song K.-I. Magnesium chloride and sulfate attacks on gravel-sand-cement-inorganic binder mixture // *Construction and Building Materials*. 2018. № 187. P. 565–571.
11. Matua V. P., Sizonets S. V. Increasing frost resistance of crushed stone and sand mixtures reinforced with mineral binders // *Ingenerny vestnik Dona*. 2012. № 4-1 (22). P. 164.
12. Şengün E., Alam B., Shabani R., Yaman I. O. The effects of compaction methods and mix parameters on the properties of roller compacted concrete mixtures // *Construction and Building Materials*. 2019. № 228. № 116807.
13. Ren D., Song H., Huang C., Xiao C., Ai C. Comparative evaluation of asphalt pavement dynamic response with different bases under moving vehicular loading // *Journal of Testing and Evaluation*. 2020. № 48 (3). № JTE20190299.
14. Xu X., Yang J., Wu C., Zhang X. Dynamic response of roller-compacted concrete-base asphalt pavement // *CICTP 2019: Transportation in China-Connecting the World-Proceedings of the 19th COTA International Conference of Transportation Professionals*. 2020. P. 893–904.
15. Korochkin A. V. The effect of the base of the roadway from the rolled (skinny) concrete on the rigidity of the structure // *Transportnoye stroitel'stvo*. 2018. № 3. P. 18–21.
16. Matua V. P., Sizonets S. V., Matua R. V. Study of reinforced gravel-sand mixtures on the accumulation of residual deformations under the influence of dynamic loads // *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. Serya: Stroitel'stvo I arkhitektura. 2013. № 30 (49). P. 154–161.