

УДК 691:624.138

Мавлиев Л.Ф. – ассистент

E-mail: lenarmavliev@yandex.ru

Буланов П.Е. – аспирант

E-mail: f_lays@mail.ru

Вдовин Е.А. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: vdovin007@mail.ru

Захаров В.В. – студент

E-mail: vadimzaharov1994@mail.ru

Гимазов А.Р. – студент

E-mail: albertgimazov@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

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

**Модификация дорожно-строительных материалов
на основе отходов камнедробления, обработанных цементом,
введением природного песка и метилсиликоната калия**

Аннотация

Проведены исследования, направленные на повышение качества отходов камнедробления известняковых пород, обработанных цементом, введением природного песка и кремнийорганической добавки метилсиликонат калия. Определено влияние природного песка в составе обработанного отхода камнедробления на физико-механические свойства. С помощью метода планирования эксперимента получены зависимости влияния расхода цемента, дозировок песка и метилсиликоната калия на физико-механические свойства обработанного отхода камнедробления. Установлены оптимальные дозировки добавок для получения материалов дорожных одежд с марками по прочности М40, М60, М75 и морозостойкости F15.

Ключевые слова: отходы камнедробления, оптимизация состава, физико-механические свойства, метилсиликонат калия, морозостойкость.

Введение

При осуществлении хозяйственной деятельности в сфере добычи полезных ископаемых возникает необходимость рационального использования отходов и местных сырьевых ресурсов. Из многообразия нерудных полезных ископаемых можно выделить отходы камнедробления строительного камня, которые в редких случаях находят применение в качестве строительного материала [1, 2].

В районах с отсутствием запасов прочного щебня, применение местных минеральных материалов, в частности отходов камнедробления известняковых пород, обработанных вяжущими, становится одной из возможностей удешевления стоимости строительства, сбережения энергии, ресурсов и времени [3-5].

Поэтому, целью данной работы явилось получение составов дорожно-строительных материалов для конструктивных слоев дорожных одежд на основе отходов камнедробления известняковых пород, обработанных цементом.

Для исследования взят отход камнедробления известняковых пород карьера у населенного пункта Рантамак Сармановского района Республики Татарстан, гранулометрический состав и основные физические свойства которого приведены в табл. 1-2.

В качестве вяжущего применялся портландцемент (ПЦ) ЦЕМ I 42,5Н ЗАО «Ульяновскцемент» в количестве 6 %, 8 % и 10 % от массы смеси.

Определение прочности на сжатие образцов производилось на водонасыщенных в течение 2 суток образцах размером 10х10х10 см, прочность на растяжение при изгибе определялась на образцах размером 10х10х40 см по ГОСТ 10180-90. Морозостойкость изучалась согласно ГОСТ 10060.3-91 на образцах-кубах с ребром 10 см. Коэффициент морозостойкости определяли как отношение прочности образца после испытания на многократное замораживание и оттаивание к прочности образца до испытания.

Коэффициент морозостойкости находили после проведения 15 циклов замораживания-оттаивания. Возраст образцов на момент проведения испытаний составлял 28 суток.

По результатам испытаний достигнута марка по прочности М20 и М40. Однако образцы разрушались после первых циклов замораживания-оттаивания, т.е. требуемая марка по морозостойкости F15 не получена.

Таблица 1

Гранулометрический состав отходов камнедробления

Размер сит, мм	10,0	5,0	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	<0,16
Частные ост, %	4,35	10,55	15,65	18,49	21,78	10,45	5,41	13,32
Полные ост., %	4,35	14,90	30,55	49,04	70,82	81,27	86,68	100

Таблица 2

Физические свойства отхода камнедробления

Наименование показателя	Фактическая величина показателя
Содержание пылевидных и глинистых частиц, в % по массе	9,07
Содержание глинистых частиц, в % по массе	0,52
Содержание лещадных частиц, в % по массе	17,98
Модуль крупности отсева	3,18

Известно, что введение гранулометрических добавок в укрепленные грунты и обработанные материалы приводит к повышению физико-механических свойств [6]. Поэтому для увеличения прочности и морозостойкости вводили добавку природного песка, гранулометрический состав и основные физические свойства которого представлены в табл. 3-4.

Таблица 3

Гранулометрический состав песка

Размер сит, мм	10,0	5,0	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	<0,16
Частные ост, %	0,06	5,41	9,42	9,84	14,32	33,36	25,80	1,82
Полные ост., %	0,06	5,47	14,89	24,70	39,02	72,38	98,18	100

Таблица 4

Физические свойства песка

Наименование показателя	Фактическая величина показателя
Содержание пылевидных и глинистых частиц, в % по массе	0,89
Содержание глинистых частиц, в % по массе	-
Модуль крупности песка	2,49 (средней крупности)

Песок вводили в отход камнедробления в процентном соотношении 10/90, 20/80, 30/70, 40/60, 50/50, 60/40, 70/30. Результаты испытаний представлены на рис. 1-3.

Анализ рис. 1-3 показал эффективность введения песка в состав отхода камнедробления. Введение песка в соотношении от 10/90 до 70/30 при расходе ПЦ 6 %, 8 %, 10 % способствовало увеличению прочности на сжатие материала на 34,9-134,4 %, 26,2-78,2 % и 23,7-67,5 % соответственно. При этом прочность на растяжение при изгибе увеличилась на 8,0-71,1 %, 8,0-63,6 % и 9,5-52,6 %, а морозостойкость до 68,0 %, 73,0 % и 76,0 %. Отсев дробления с добавкой песка при расходе ПЦ 6 % достиг марки по прочности М20 и М40, при 8 % и 10 % – М40 и М60.

Требуемая марка по морозостойкости обработанного отхода камнедробления, составляющая F15 для несущего основания или покрытия дорожной одежды в климатических условиях Республики Татарстан, получена при введении ПЦ не менее 10 % и песка в соотношении 70/30. Следовательно, для повышения физико-механических свойств, особенно морозостойкости, без увеличения расхода ПЦ и наполнителей требуется модификация материалов различными способами, в том числе введением целевых добавок [7-14].

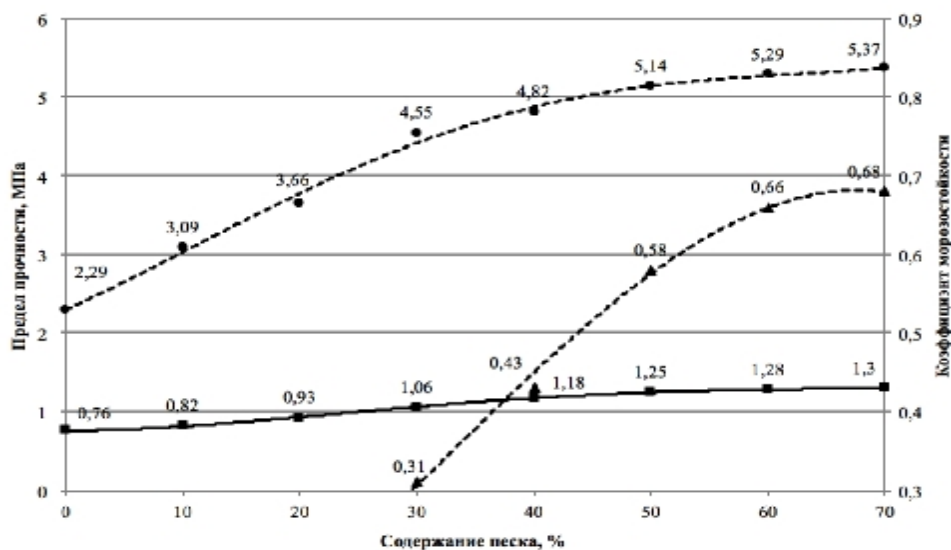


Рис. 1. Зависимость физико-механических свойств отхода камнедробления, обработанного 6 % ПЦ, от содержания песка в смеси:

- — — — — предел прочности на растяжение при изгибе;
- — — — — предел прочности на сжатие;
- - - - - коэффициент морозостойкости

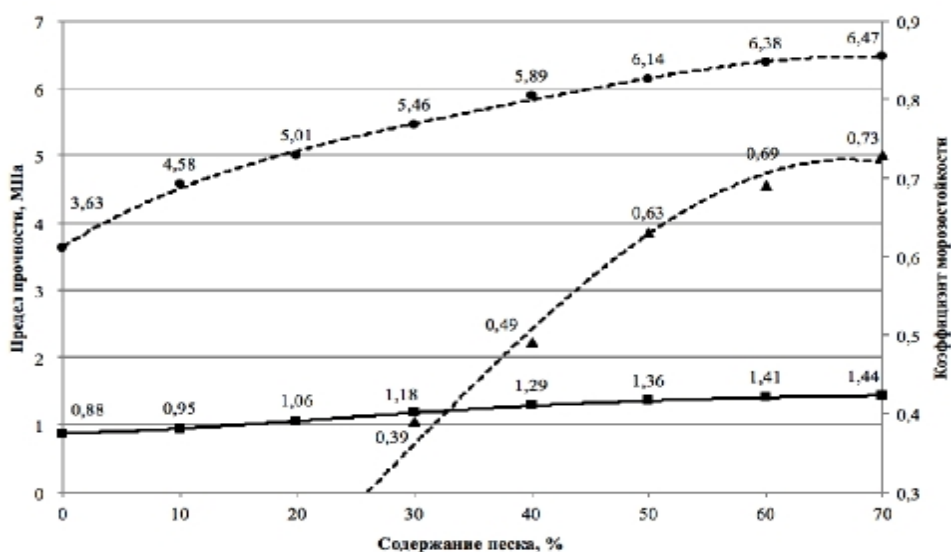


Рис. 2. Зависимость физико-механических свойств отхода камнедробления, обработанного 8 % ПЦ, от содержания песка в смеси:

- — — — — предел прочности на растяжение при изгибе;
- — — — — предел прочности на сжатие;
- - - - - коэффициент морозостойкости

Одним из наиболее перспективных направлений в решении проблемы морозостойкости, является модификация обработанного материала гидрофобизирующими кремнийорганическими добавками. Проведенные эксперименты показали, что в качестве кремнийорганического соединения целесообразно использовать метилсиликонат калия (МСК) [15].

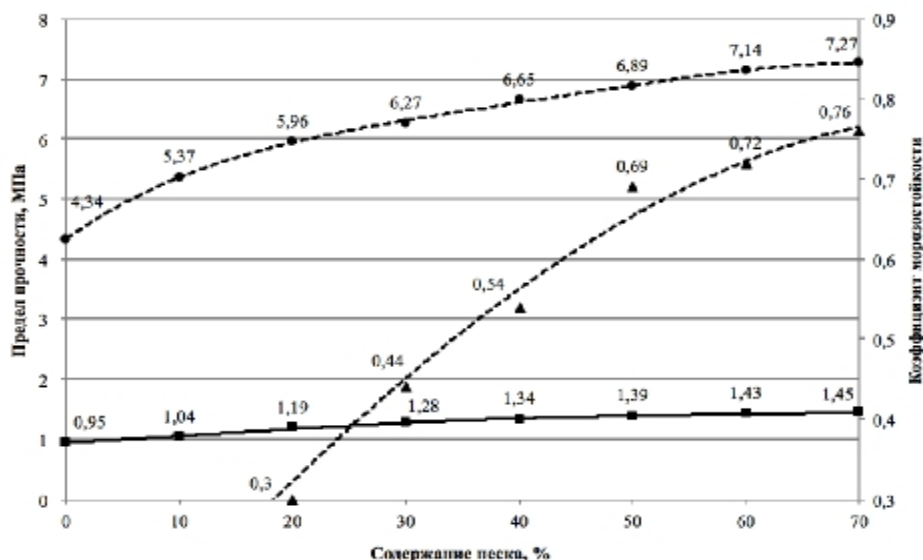


Рис. 3. Зависимость физико-механических свойств отхода камнедробления, обработанного 10 % ПЦ, от содержания песка в смеси
 ———— — предел прочности на растяжение при изгибе;
 ———— — предел прочности на сжатие;
 - - - - - коэффициент морозостойкости

Для оптимизации состава обработанного материала применен метод математического планирования эксперимента. В качестве переменных факторов выбраны процентное содержание: ПЦ (X_1), песок (X_2) и МСК (X_3). Добавка МСК вводилась в количестве 0,05 %, 0,09 %, 0,13 % от массы смеси. Основной уровень и интервалы варьирования факторов приведены в табл. 5.

Таблица 5

Кодированные и натуральные переменные факторы

ПЕРВЫЙ ФАКТОР	ВТОРОЙ ФАКТОР	ТРЕТИЙ ФАКТОР
X_1 – ПЦ	X_2 – песок	X_3 – МСК
Основное значение	Основное значение	Основное значение
X_{1_0}	X_{2_0}	X_{3_0}
8	40	0,09
Интервал варьирования	Интервал варьирования	Интервал варьирования
ΔX_1	ΔX_2	ΔX_3
2	20	0,04

В качестве параметров оптимизации (функций отклика) приняты:

$R_{сж}$ – предел прочности на сжатие, МПа;

$R_{изг}$ – предел прочности на растяжение при изгибе, МПа;

$K_{мор}$ – коэффициент морозостойкости.

Уравнения регрессии представлены в виде полинома второй степени:

$$R_{сж} = -8,657571 + 2,205547 \cdot X_1 + 0,132117 \cdot X_2 + 15,01214 \cdot X_3 - 0,00107143 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,684525 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,008929 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,103713 \cdot X_1^2 - 0,001104 \cdot X_2^2 - 84,98288 \cdot X_3^2;$$

$$R_{изг} = -1,544446 + 0,4082 \cdot X_1 + 0,033316 \cdot X_2 + 5,899429 \cdot X_3 - 0,000773811 \cdot X_1 \cdot X_2 + 3,30424 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,014881 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,019521 \cdot X_1^2 - 0,00025 \cdot X_2^2 - 32,00213 \cdot X_3^2;$$

$$K_{мор} = -1,889224 + 0,321941 \cdot X_1 + 0,034623 \cdot X_2 + 7,300002 \cdot X_3 - 0,001309526 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,14881 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,020833 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,015267 \cdot X_1^2 - 1,000169 \cdot X_2^2 - 38,16668 \cdot X_3^2.$$

Расчетные значения F – критерия Фишера (оценка адекватности) для функций $R_{сж}$, $R_{изг}$, $K_{мор}$ равны соответственно 1,80; 1,68; 2,86, т.е. меньше табличного, которое при уровне значимости 5 % равно 5,05. Это свидетельствует о том, что уравнения адекватны.

По полученным уравнениям регрессии построены функции отклика в виде двухпараметрических зависимостей. На рисунках 4-6 приведены зависимости предела прочности на сжатие ($R_{сж}$), предела прочности на растяжение при изгибе ($R_{изг}$) и коэффициента морозостойкости ($K_{мор}$) обработанного материала от содержания песка и МСК при расходе ПЦ 6 %, 8 % и 10 %.

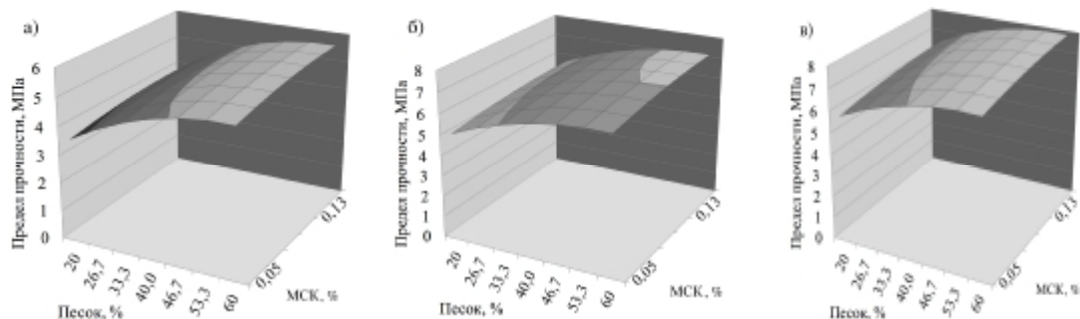


Рис. 4. Зависимость предела прочности на сжатие отхода камнедробления, обработанного цементом, от содержания песка и МСК при расходе ПЦ: а) 6 %; б) 8 %; в) 10 %

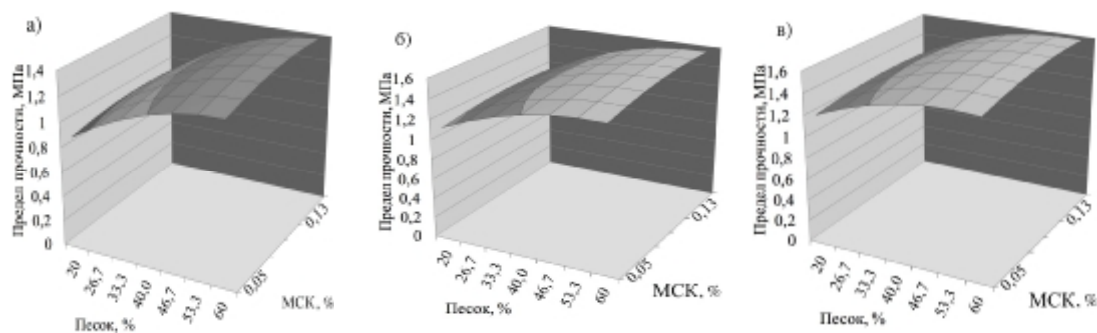


Рис. 5. Зависимость предела прочности на сжатие отхода камнедробления, обработанного цементом, от содержания песка и МСК при расходе ПЦ: а) 6 %; б) 8 %; в) 10 %

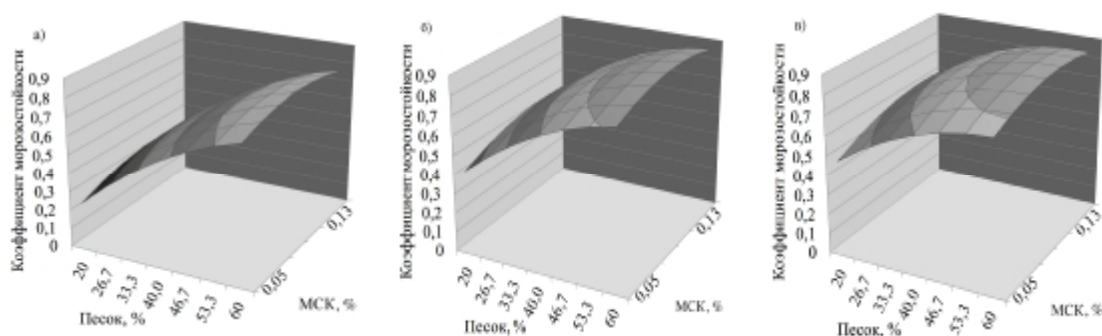


Рис. 6. Зависимость предела прочности на сжатие отхода камнедробления, обработанного цементом, от содержания песка и МСК при расходе ПЦ: а) 6 %; б) 8 %; в) 10 %

Анализ графиков рис. 4-6 показал эффективность комплексного введения песка и МСК в состав отхода камнедробления, обработанного цементом, для повышения физико-механических свойств.

Марка обработанного материала по прочности М40 и морозостойкости F15 получена при содержании песка – 53,3 % и МСК – 0,077 % с расходом ПЦ 6 %, при этом предел прочности на сжатие достиг 5,41 МПа, предел прочности на растяжение при

изгибе – 1,35 МПа, коэффициент морозостойкости – 0,76.

Марка по прочности М60 и марка по морозостойкости F15 получена при содержании песка – 40 % и МСК – 0,077 % с расходом ПЦ 8 %. Предел прочности на сжатие составил 6,62 МПа, предел прочности на растяжение при изгибе – 1,47 МПа, коэффициент морозостойкости – 0,77.

Марка по прочности М75 и марка по морозостойкости F15 получена при содержании песка – 46,7 % и МСК – 0,09 % с расходом ПЦ 10 %. Предел прочности на сжатие составил 7,60 МПа, предел прочности на растяжение при изгибе – 1,57 МПа, коэффициент морозостойкости – 0,83.

Обсуждение результатов

Введение песка в состав обработанного отхода камнедробления позволило повысить прочность и морозостойкость, что согласуется с ранними исследованиями [6]. Однако, даже при повышенных дозировках песка, требуемая марка по морозостойкости достигается при расходе цемента не менее 10 %.

На сегодняшний день для модификации и повышения долговечности (морозостойкости) строительных материалов широко применяются кремнийорганические соединения, которые фиксируясь на поверхности материалов, гидрофобизируют стенки пор и капилляров. Это обстоятельство положительно влияет на улучшение морозостойкости, так как адгезия кристаллов солей и льда к гидрофобной поверхности пор снижается. Введение добавки МСК совместно с песком позволило получить дорожно-строительные материалы на основе отходов камнедробления, обработанных цементом, с требуемыми марками по прочности и морозостойкости, а также пониженным расходом вяжущего.

Заключение

Исследовано изменение физико-механических свойств обработанного отхода камнедробления при введении природного песка и метилсиликоната калия. Установлены математические зависимости влияния расхода ПЦ, дозировок песка и МСК на физико-механические свойства обработанного материала. Получены оптимальные составы обработанного отхода камнедробления с марками по прочности М40, М60, М75 и морозостойкости F15.

Список библиографических ссылок

1. Пухаренко Ю.В., Панарин С.Н., Веселова С.И., Черевко С.А. Применение отходов камнедробления в бетонах // Технологии бетонов, 2013, № 11 (88). – С. 34-35.
2. Демьянова В.С., Чумакова О.А. Комплексное использование материалов и отходов добычи камнедробления нерудных полезных ископаемых в мелкозернистых бетонах нового поколения // Региональная архитектура и строительство, 2014, № 4. – С. 57-60.
3. Чудинов С.А., Дмитриев В.Н., Хохлов А.М. Технология комплексной переработки металлургических шлаков для дорожного строительства // Актуальные вопросы проектирования автомобильных дорог. Сборник научных трудов ОАО «ГИПРОДОРНИИ», 2014, № 5 (64). – С. 116-123.
4. Мурзич С.А., Булдаков С.И., Сарафанов К.В. Применение песчано-щебеночной смеси при строительстве автомобильных дорог из укрепленного грунта // Транспорт Урала, 2015, № 3 (46). – С. 102-104.
5. Ходжамуродов С.К., Джумаев Д.С., Саидов Ф.Х. Морозостойкость цементогрунта в зависимости от степени его водонасыщения и температуры замораживания // Наука, техника и образование, 2015, № 12 (18). – С. 67-71.
6. Вдовин Е.А., Мавлиев Л.Ф. Повышение качества местных укрепленных грунтов путем регулирования гранулометрического состава // Известия КГАСУ, 2011, № 4 (18). – С. 219-223.
7. Хузин А.Ф., Габидуллин М.Г., Рахимов Р.З., Габидуллина А.Н., Стоянов О.В. Модификация цементных композитов углеродными нанотрубками // Вестник

- Казанского технологического университета, 2013, № 5. – С. 115-118.
8. Санников С.П., Жигайлов А.А., Андреев В.С. Влияние материалов серии «Типром» и «Пенетрон» на свойства цементогрунта, применяемого в дорожном строительстве // Научно-технический вестник Поволжья, 2015, № 1. – С. 132-134.
 9. Боргонутдинов А.М., Бурмистрова О.Н., Тимохова О.М. Обоснование модели электрохимического закрепления водонасыщенных глинистых грунтов земляного полотна лесных дорог // Фундаментальные исследования, 2015, № 2-10. – С. 2069-2073.
 10. Исаев Б.Н., Бадеев С.Ю., Цапкова Н.Н., Лунев А.Г., Кузнецов М.В., Бадеев В.С., Логутин В.В. Способ создания в грунтовом массиве пространственных структур из твердеющего материала // Геотехника, 2012, № 5. – С. 4-12.
 11. Сигачев Н.П., Коновалова Н.А., Панков П.П., Ефименко Н.С., Григорьев Д.А. Дорожные цементогрунты на основе золошлаковых отходов Забайкальского края, модифицированные полимерной добавкой // Вестник забайкальского государственного университета, 2015, № 7 (122). – С. 28-36.
 12. Глазков С.С., Кукина О.Б., Будасов С.Б., Черепахин А.М. Разработка комплексной стабилизирующей добавки для цементогрунтов // Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, 2014, № 2 (9). – С. 53-58.
 13. Вдовин Е.А., Мавлиев Л.Ф. Повышение качества укрепленных грунтов введением гидрофобизирующих добавок // Известия КГАСУ, 2012, № 4 (22) – С. 373-378.
 14. Гайда Ю.В., Айзенштадт А.М., Мальков В.С., Фомченков М.А. Органоминеральная добавка для укрепления песчаных грунтов // Промышленное и гражданское строительство, 2015, № 11. – С. 25-29.
 15. Буланов П.Е., Мавлиев Л.Ф., Вдовин Е.А., Асадуллина А.Р., Гараева Ж.Б., Максимов В.Г. Опыт промышленного внедрения щебеночно-песчаной смеси, обработанной портландцементом в комплексе с пластифицирующей и гидрофобизирующей добавкой при строительстве автомобильной дороги // Известия КГАСУ, 2015, № 4 (34). – С. 346-351.

Mavliev L.F. – assistant

E-mail: lenarmavliev@yandex.ru

Bulanov P.E. – post-graduate student

E-mail: f_lays@mail.ru

Vdovin E.A. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: vdovin007@mail.ru

Zaharov V.V. – student

E-mail: vadimzaharov1994@mail.ru

Gimazov A.R. – student

E-mail: albertgimazov@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

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

The modification of road-building materials based on run-of-crusher stone, treated by cement, by the introduction of natural sand and methylsiliconate potassium

Resume

When the economic activities are exercise of in the field of mining, there is a necessity of rational using of wastes and local raw materials. From the variety of non-metallic minerals the run-of-crusher building stone can be identified, which in rare cases, are used as a building material. In areas with a lack of inventory of durable rubble, using the local mineral materials, in particular run-of-crusher stone limestone, treated by cement, become one of the possibilities to reduce the construction cost, saving energy, resources and time. However, run-of-crusher stone treated by cement have a low rates of strength and freeze-thaw resistance and therefore, it is require the modification by different target additives, including organosilicon compounds. The influence of the natural sand in the composition of the treated run-of-crusher stone on physical and mechanical properties was determined. With the experimental design method

according to the impact of consumption of cement, sand and methylsiliconate potassium on physical and mechanical properties of the treated run-of-crusher stone were obtained. The optimal dosage of additives to produce materials with marks on the M40 strength, M60, M75 and frost resistance F15 were found.

Keywords: run-of-crusher stone, optimization of composition, physical and mechanical properties, methylsiliconate potassium, freeze-thaw resistance.

Reference list

1. Pukharens Yu.V., Panarin S.N., Veselova S.I., Cherevko S.A. Application of stone crushing wastes in concrete // *Tehnologii betonov*, 2013, № 11 (88). – P. 34-35.
2. Demyanova V.S., Kazakov O.A. Integrated use of materials and production waste lithoclasty non-metallic minerals in the fine-grained concrete of new generation // *Regionalnaya arkhitektura i stroitelstvo*, 2014, № 4. – P. 57-60.
3. Chudinov S.A., Dmitriev V.N., Khokhlov A.M. Technology of using unrecyclable metallurgical slag in road construction // *Aktualnyye voprosy proyektirovaniya avtomobilnykh dorog. Sbornik nauchnykh trudov OAO «GIPRODORNII»*, 2014, № 5 (64). – P. 116-123.
4. Murzich S.A., Buldakov S.I., Sarafanov K.B. The use of sand-grit mixture in road construction with stabilized soil // *Transport Urala*, 2015, № 3 (46). – P. 102-104.
5. Khodzhamurodov S.K., Dzhumaev D.S., Saidov F.Kh. Frost soil-cement depending on the degree of water saturation and freezing temperature // *Nauka, tekhnika i obrazovaniye*, 2015, № 12 (18). – P. 67-71.
6. Vdovin E.A., Mavliev L.F. Improvement of quality of local staked priming coats by grain size distribution regulation // *Izvestiya KGASU*, 2011, № 4 (18). – P. 219-223.
7. Khuzin A.F., Gabdullin M.G., Rakhimov R.Z., Gabidullina A.N., Stoyanov O.V. The modification of cement composites with carbon nanotubes // *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2013, № 5. – P. 115-118.
8. Sannikov S.P., Zhigaylov A.A., Andreyev V.S. Influence of materials «Tiprom» series and «Penetron» on soil-cement properties, used in road construction // *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzh'ya*, 2015, № 1. – P. 132-134.
9. Burganudinov A.M., Burmistrova O.N., Timokhova O.M. Model validation electrochemical induration water-saturated clay subgrade soil forest road // *Fundamental'nyye issledovaniya*, 2015, № 2-10. – P. 2069-2073.
10. Isayev B.N., Ivanov S.Yu., Tsapkova N.N., Lunev A.G., Kuznetsov M.V., Badeyev V.S., Logutin V.V. A way to create spatial structures of hardening material in a soil massif // *Geotekhnika*, 2012, № 5. – P. 4-12.
11. Sigachev N.P., Konovalova N.A., Pankov P.P., Yefimenko N.S., Grigor'yev D.A. Road soils-cement on the basis of ash wastes of Transbaikalian region, modified by polymer additives // *Vestnik zabaykalskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, № 7 (122). – P. 28-36.
12. Glazkov S.S., Shchukina O.B., Budasov S.B., Cherepakhin A.M. Development of an integrated stabilizing additives for tsementogrunтов // *Voronezhskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitel'nyy universitet*, 2014, № 2 (9). – P. 53-58.
13. Vdovin E.A., Mavliev L.F. Improving the quality of soil reinforcement by introducing hydrophobic additives // *Izvestiya KGASU*, 2012, № 4 (22). – P. 373-378.
14. Gayday Yu.V., Ayzenshtadt A.M., Markov V.S., Savchenko M.A. Organomineralnoj supplement for strengthening sandy soils // *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*, 2015, № 11. – P. 25-29.
15. Bulanov P.E., Mavliev L.F., Vdovin E.A., Asadullina A.R., Garaeva Zh.B., Maksimov V.G. The experimental-industrial introduction of stone-sand mixture treated by portland cement in combination with plasticizer and water-repellent additive for the road construction // *Izvestiya KGASU*, 2015, № 4 (34). – P. 346-351.