

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2023, Том 10, № 4 / 2023, Vol. 10, Iss. 4 <https://t-s.today/issue-4-2023.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/18SATS423.pdf>

DOI: 10.15862/18SATS423 (<https://doi.org/10.15862/18SATS423>)

2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

Цементные материалы высокой подвижности

¹Золотарева С.В., ²Аюбов Н.А., ³Федюк Р.С., ¹Клюев С.В., ⁴Лисейцев Ю.Л.

¹ФГБОУ ВО «Белгородский государственный
технологический университет имени В.Г. Шухова», Белгород, Россия

²ФГБУН «Комплексный научно-исследовательский институт
имени Х.И. Ибрагимова Российской академии наук», Грозный, Россия

³ФГОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия

⁴ФГОУ ВО «Приамурский государственный
университет имени Шолом-Алейхема», Биробиджан, Россия

Автор, ответственный за переписку: Федюк Роман Сергеевич, e-mail: roman44@ya.ru

Аннотация. Анализируя основные показатели уровня развития территориальной дорожной сети нашей страны, приходим к выводу, что требуется ее масштабное переоснащение. Разработана широкая номенклатура смесей с высокой проникающей способностью из композиционных вяжущих, измельченных до $S_{уд} = 500 \text{ м}^2/\text{кг}$. Характеристика вязкости разработанных материалов свидетельствует об их высокой проникающей способности, т. к. время истечения исследуемых материалов через вискозиметр Марша составляет 33–39 секунды при водовытесном отношении 0,62 и расходе воды 140 л/м^3 . Растворы характеризуются маркой по удобоукладываемости П4 (осадка конуса больше 30 см). Установлено, что эффект роста прочности на сжатие смесей увеличивается при применении композиционного вяжущего. В частности, в возрасте 2 суток прочность на сжатие смесей на вяжущем низкой водопотребности возросла на 56 % по сравнению с бездобавочным

составом. Разработанные растворы соответствуют требованиям ГОСТ 59538-2021: удельная поверхность цемента $450 \text{ м}^2/\text{кг}$, классы прочности на сжатие — В5–В10, стабильные и условно-стабильные, марки по водонепроницаемости — W6–W16, марка по морозостойкости — F2100. Исследования деформативных свойств смесей (модуль упругости 8,92 ГПа, призмочная прочность 10,2 МПа), дают основание сделать вывод о том, что на основе щебня из метаморфических сланцев, возможно получение бетонов для дорожных оснований, соответствующих нормативной документации. Разработанные составы позволяют при укреплении щебеночных оснований получать бетоны класса В5–В10, и их можно использовать при устройстве оснований II категории автодорог.

Ключевые слова: цемент; материал; проницаемость; подвижность; дорожная одежда; бетон; щебень

High workability cement materials

¹Svetlana V. Zolotareva, ²Narman A. Ayubov,
³Roman S. Fediuk, ¹Sergey V. Klyuev, ⁴Yury L. Liseitsev

¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

²Comprehensive Research Institute named after

H.I. Ibragimov of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Russia

³Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

⁴Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan, Russia

Corresponding author: Roman S. Fediuk, e-mail: roman44@ya.ru

Abstract. Analysing the main indicators of the territorial road network development level of our country, we come to the conclusion that it requires a large-scale re-equipment. A wide range of mixtures with high penetrating ability from composite binders ground to $S_{sw} = 500 \text{ m}^2/\text{kg}$ has been developed. The viscosity characteristic of the developed materials testifies to their high penetrating ability, because the time of flow of the investigated materials through the Marsh viscometer is 33–39 seconds at a water-binding ratio of 0,62 and water consumption of 140 l/m^3 . The mixtures are characterised by P4 grade of workability (cone slump more than 30 cm). It is established that the strength enhancement effect of mixtures' compressive strength increases at application of composite binder. In particular, at the age of 2 days the mixtures' compressive strength on low water consumption binder increased by 56 % in comparison with the additive-free composition. The developed mixtures meet the

requirements of GOST 59538-2021: specific surface of cement $450 \text{ m}^2/\text{kg}$, compressive strength classes — B5–B10, stable and conditionally stable, water resistance grades — W6–W16, frost resistance grade — F2100. Studies of stress-related characteristics of mixtures (elastic modulus 8,92 GPa, prism strength 10,2 MPa), give grounds to conclude that on the basis of crushed stone from metamorphic slate stone, it is possible to obtain concrete for roadbed, corresponding to the normative documentation. The developed compositions make it possible to produce concrete of class B5–B10 when strengthening crushed stone bases and they can be used in the construction of bases of II category of motorways.

Keywords: cement; material; penetrability; mobility; road pavement; concrete; crushed stone

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

По данным¹, 8,1 % региональных дорог и 43,6 % местных дорог в Российской Федерации не имеют твёрдого покрытия. Это означает, что значительная часть дорог имеет грунтовое или другое непостоянное покрытие, что может приводить к проблемам с проходимостью, безопасностью и комфортом движения.

Более того, анализируя основные показатели уровня развития территориальной дорожной сети нашей страны, приходим к выводу, что требуется ее масштабное переоснащение [1–3]. Помимо необходимости масштабного расширения дорожной сети, отечественным дорогам присущи многие типичные разрушения покрытий: колеи, сдвиги, трещины, выкрашивание, шелушение, выбоины, истирание, волны, проломы, просадки [4–8].

Совершенствование и развитие отечественной транспортной инфраструктуры страны требует осуществления масштабных мероприятий, роста и технической модернизации промышленных мощностей с одновременной подготовкой компетентных специалистов дорожно-транспортного сектора [9; 10].

При этом, значительную важность приобретает вопрос материально-технического обеспечения ресурсами, в том числе, дорожно-строительными материалами [11].

Эффективному решению данного вопроса могут стать ресурсы, образующиеся при работе горнодобывающего комплекса Курской магнитной аномалии (КМА) [12], шлаки основного производства [13], метаморфические сланцы и отходы мокрой магнитной сепарации (ММС) железистых кварцитов Лебединского [14] и Стойленского горно-обогатительных комбинатов [15], а также отслужившие шины автомобилей [16–20] и многотоннажные отходы базальтового производства [21–25].

Эти материалы в настоящее время применяются недостаточно, поэтому требуются исследования по этому вопросу.

Целью статьи является разработка научно обоснованного технологического решения, направленного на получение высокопроницающих составов для оснований дорожных одежд.

¹ Сайт Росавтодора [Электронный ресурс]. Адрес доступа: <https://map.rosavtodor.gov.ru/> (дата обращения 28.06.2023).

Материалы и методы

Materials and methods

В данной работе необходимо было разработать композиционные вяжущие, такие как: ТМЦ-50 и ВНВ-50, с удельной поверхностью 500 м²/кг получаемых на основе ЦЕМ I 42.5 Н ЗАО «Белгородский цемент» и добавки суперпластификатора Полипласт СП-ПФК-НЛМ. Цементы этого предприятия характеризуются стабильностью качества.

Соотношение содержания основных компонентов представленного образца цемента указывает на его соответствие ГОСТ 31108-2020 (рис. 1).

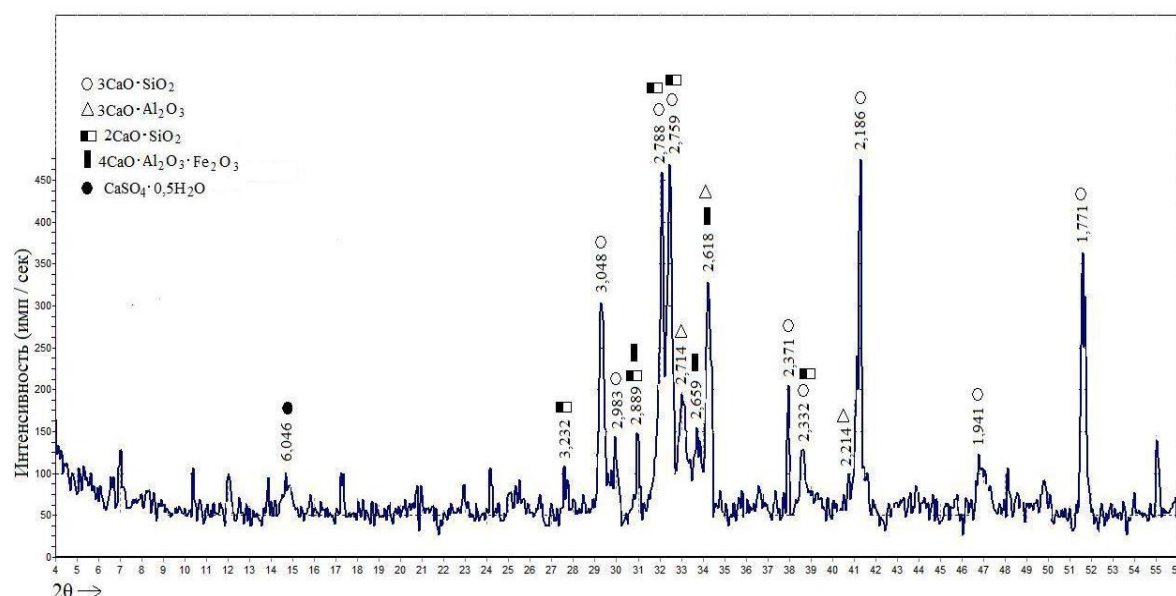


Рисунок 1. Дифрактограмма цемента (составлено авторами)

Figure 1. Diffractogram of cement (compiled by the authors)

Отходы ММС представляют собой техногенный тонкодисперсный песок темно-серого цвета, состоящий из неокатанных частичек кварца (около 60 %), полевых шпатов, амфиболов, карбонатов, магнетита, гематита и их агрегатов (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Зерновой состав отходов ММС

Grain composition of magnetic wet separation waste

Порода Rock	Удельная поверхность, м ² /кг Specific surface, m ² /kg	Средневзвешенный диаметр, мм Weighted average diameter, mm	Модуль крупности Fineness modulus	Зерновой состав, % (размеры фракций, мм) Grain composition, % (fraction size, mm)			
				0,21–0,42	0,10–0,21	0,074–0,10	< 0,074
Кварцит Quartzite	80–90	0,08–0,13	0,6–0,9	0,0–10	0,2–10	1,0–10	70,0–96,0

Составлено авторами / Compiled by the authors

Модуль крупности отходов ММС значительно меньше 1, около 70–85 % частичек — меньше 0,074 мм. Ежегодно таких песков складывается в хвостохранилищах десятки миллионов тонн, что позволяет рассматривать их в качестве мощной сырьевой базы для промышленности строительных материалов в целом и для производства дорожно-строительных материалов в частности.

В качестве компонентов вяжущего применялись техногенные волокнистые материалы (ТВМ), представляющие собой отходы базальтового производства (минеральной ваты «Извол»), а также технический углерод (ТУ), полученный путем термической обработки отслуживших автомобильных шин. Экспериментальным путем определены основные физико-химические параметры технического углерода (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Физико-химические параметры технического углерода

Physico-chemical parameters of carbon black

Параметр <i>Parameter</i>	Значение <i>Value</i>
Удельная поверхность, м ² /г / <i>Specific surface, m²/g</i>	12–18
Диаметр частиц, мкм / <i>Particle diameter, μm</i>	155
рН водной суспензии / <i>pH of water slurry</i>	8
Насыпная плотность, кг/м ³ / <i>Bulk density, kg/m³</i>	300
Истинная плотность, кг/м ³ / <i>True density, kg/m³</i>	990

Составлено авторами / Compiled by the authors

Из полученных результатов видно, что ТУ легче воды, с щелочной реакцией водной суспензии. Таким образом, технический углерод представлен в среднем частицами 155 мкм с включениями крупных агломератов размером до 1–2 мм, состоящими из практически однородных наночастиц размером 10–20 нм. ТУ отличается высокими гидрофобными свойствами при истинной плотности порошка 900 кг/м³, насыпной плотности 300 кг/м³. Химический состав ТУ составляет 70–80 % углерода, 10–15 % кислорода, а также присутствуют примесные соединения цинка, железа, серы, кремния и других элементов.

Исходя из химического состава отходов минеральной базальтовой ваты, в них содержится до 44 % SiO₂ (табл. 3), как было установлено ранее, большая часть, в аморфном состоянии.

Таблица 3 / Table 3

Химический состав отходов минеральной базальтовой ваты (мас. %)

Chemical composition of waste mineral basalt wool (wt. %)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
44,11	12,26	9,44	16,00	13,19	2,2	0,78	1,42

Составлено авторами / Compiled by the authors

В зависимости от параметров и условий процесса получения образуется некоторое количество сферических частиц — «корольков». В исходном состоянии «корольки» представляют собой сыпучий, грубодисперсный материал, в котором практически отсутствует пылевидная фракция.

Ценным сырьем для получения заполнителя для дорожных бетонов являются метаморфические сланцы, представляющие собой микрозернистые породы от темно-серого до черного цвета, с шелковистым блеском плоскости раскола, сланцеватой, иногда микрополосчатой или линзовидно-полосчатой текстуры. Основными породообразующими минералами являются кварц (до 65 %) и слюда (35–40 %).

Химический состав сланцев приведен в таблице 4.

Таблица 4 / Table 4

Химический состав сланцев, мас. %
Chemical composition of slate stones, wt. %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	п.п.п.
53–65	14–25	1–2	2–9	5–9	1–2	3–5	0–1	4–6	1–2	4–6

Составлено авторами / Compiled by the authors

Таблица 5 / Table 5

Сравнительная характеристика сырьевых ресурсов КМА
Comparative characteristics of Kursk Magnetic Anomaly raw material resources

Характеристики щебня <i>Characteristics of crushed stone</i>	Образец щебня <i>Crushed stone sample</i>		
	кварцито-песчаник <i>quartzitic sandstone</i>	сланцевый щебень <i>shale crushed stone</i>	гранит <i>granite</i>
Зерновой состав по фракциям, % <i>Grain composition by fraction, %</i>			
200 мм / 200 mm	15,6	16,8	3,2
135 мм / 135 mm	62,5	48,4	49,8
70 мм / 70 mm	21,3	34,2	46,7
Содержание пылевидных и глинистых частиц, % <i>Dust and clay particles content, %</i>	0,6	0,6	0,3
Содержание глины в комках, % <i>Clay content in lumps, %</i>	-	-	-
Содержание зерен слабых пород, % <i>Content of grains of soft rocks, %</i>	4	5	3
Зерна лещадной формы, % <i>Flatness grain form, %</i>	35	44,1	11
Марка по механической прочности <i>Mechanical strength grade</i>	1 200	800	1 200
Морозостойкость <i>Frost resistance</i>	200	200	200
Насыпная плотность, кг/м ³ <i>Bulk density, kg/m³</i>	1 390	1 350	1 380
Марка по истираемости <i>Abrasion resistance grade</i>	И1	И1	И1

Составлено авторами [8] / Compiled by the authors [8]

Анализ сырьевых ресурсов КМА показал, что возможно использование в качестве заполнителя для дорожного бетона метаморфических сланцев (табл. 5).

Сводный перечень исследований, осуществленных в работе, приведен в таблице 6.

Таблица 6 / Table 6

Перечень проведенных исследований

List of conducted studies

№ п/п	Вид исследования <i>Type of study</i>	Нормативный документ <i>Regulatory document</i>	Размер образца <i>Sample size</i>	Исследуемые характеристики <i>Investigated characteristics</i>
1	Лазерная гранулометрия <i>Laser granulometry</i>	ГОСТ Р 57923-2017	0,01–1 000 мкм	гранулометрический состав <i>grain size composition</i>
2	Удельная поверхность <i>Specific surface</i>	ГОСТ 310.2-76, 23789-79, 21043-87	0,5–200 мкм	площадь удельной поверхности <i>specific surface area</i>
3	Рентгено-дифракционный анализ <i>X-ray diffraction analysis</i>	ГОСТ 16865-79	порошок <i>powder</i>	минералогический и фазовый состав <i>mineralogical and phase composition</i>
4	Подвижность смеси <i>Mixture mobility</i>	ГОСТ Р 57809-2017	6 л	расплыв конуса, осадка конуса <i>flow rate, cone slump</i>
5	Призменная прочность <i>Prism strength</i>	ГОСТ 24452-80	150×150×600 мм	призменная прочность <i>prism strength</i>
6	Модуль упругости <i>Modulus of elasticity</i>	ГОСТ 24452-80	150×150×600 мм	модуль упругости <i>modulus of elasticity</i>
7	Деление массы на объем <i>Mass to volume division</i>	ГОСТ 12730.1-2020	70×70×70 мм	средняя плотность <i>mass specific gravity</i>
8	Статическое сжатие <i>Static compression</i>	ГОСТ 10180-2012	100×100×100 мм	прочность при сжатии <i>compressive strength</i>
9	Статический изгиб <i>Static bending</i>	ГОСТ 10180-2012	40×40×160 мм	прочность при изгибе <i>bending strength</i>
10	Вязкость <i>Viscosity</i>	ГОСТ 310.6-2020	1 л.	вязкость и седиментация, марка по прочности, морозостойкость <i>viscosity and sedimentation, strength class grade, frost resistance</i>
11	Характеристики щебня <i>Crushed stone characteristics</i>	ГОСТ 8269.0-97	щебень <i>crushed stone</i>	гранулометрия, форма зерен <i>granulometry, grain shape</i>
12	Водопоглощение <i>Water absorption</i>	ГОСТ 12730.3-2020	100×100×100 мм	водопоглощение по массе <i>water absorption by mass</i>
13	Морозостойкость <i>Frost resistance</i>	ГОСТ 10060	100×100×100 мм	марка по морозостойкости F ₂ <i>frost resistance grade F2</i>
14	Водонепроницаемость <i>Waterproofing</i>	ГОСТ 12730.5-2018	Цилиндры Ø150 мм, высотой 30 мм <i>Cylinders Ø150 mm, height 30 mm</i>	марка по водонепроницаемости <i>water resistance grade</i>

Составлено авторами / Compiled by the authors

Результаты и дискуссия

Results and discussion

Для строительства укрепленных оснований автомобильных дорог и укрепления щебеночных оснований применимы малопрочные бетоны, в связи с этим предлагается использовать смеси с высокой проникающей способностью на основе композиционных вяжущих с использованием техногенного сырья КМА (отходов мокрой магнитной сепарации). Изучение физико-химических закономерностей деформационных процессов, завершающихся разрушением данного твердого тела в зависимости от его состава и структуры, влияния температуры и внешней среды, связано с развитием теории различных процессов механической обработки твердых тел давлением, резанием, а также дроблением и тонким измельчением. С другой стороны, возникновение пространственных структур твердых тел, с заданными механическими свойствами, относится к теории образования новых дисперсных твердых фаз из первоначальной жидкой среды — переохлажденного расплава или пересыщенного раствора путем спрессовывания и спекания первоначально не связанных друг с другом твердых частичек порошка.

Характеристики бетона такие, как например снижение себестоимости единицы продукции и обеспечение заданного уровня прочности бетона, необходимой морозостойкости или непроницаемости, являются теми ограничениями, при обеспечении которых достигается минимум целевой функции. В каждом конкретном случае необходимо выделить основную физико-механическую характеристику бетона, которая должна быть обеспечена при решении задач оптимизации технологического процесса, а остальные характеристики будут принимать соответствующие значения.

Для оценки возможности применения щебня из метаморфического сланца как сырья для получения бетона дорожных оснований были разработаны составы бетона с использованием в качестве вяжущего ВНВ-50 на основе отходов мокрой магнитной сепарации и портландцемент ЦЕМ I 42.5 Н, их характеристики приведены в таблице 7.

Согласно ГОСТ 59538-2021 и ГОСТ Р 70308-2022, для инъекционных растворов необходимо оценивать ряд характеристик: водоцементное отношение, удобоукладываемость, водоотделение, плотность смеси, прочность на сжатие, морозостойкость.

Разработана широкая номенклатура СВПС из композиционных вяжущих, измельчённых до $S_{уд} = 500 \text{ м}^2/\text{кг}$. В качестве мелкого заполнителя применялся полифракционный отсев дробления сланцевого щебня с модулем крупности 2,7.

Таблица 7 / Table 7

Состав смесей высокой проникающей способности, СВПС

Composition of high penetration capability mixtures, HPCM

№ состава (используемое вяжущее) No. of composition (binder used)	Расход, кг на 1 м ³ Consumption, kg per 1 m ³					В/В water-binding ratio
	вяжущее binder	отсев щебня crushed stone sift	песок sand	вода water	СП superplasticizer	
СВПС1(ЦЕМ I 42.5 Н)	225	1 320	620	151	2,25	0,57
СВПС 2(ЦЕМ I 42.5 Н) + ТВМ	225	1 320	620	151	2,25	0,57
СВПС 3(ЦЕМ I 42.5 Н) + ТВМ + ТУ	225	1 320	620	151	2,25	0,57
СВПС4 (ВНВ-50)	225	1 320	620	140	2,25	0,62
СВПС5 (ВНВ-50) + ТВМ	225	1 320	620	140	2,25	0,62
СВПС6 (ВНВ-50) + ТВМ + ТУ	225	1 320	620	140	2,25	0,62

Составлено авторами / Compiled by the authors

Портландцемент замещался отходами ММС железистых кварцитов в количестве 50 мас. % при добавлении 5 мас. % ТВМ и 4 мас. % ТУ. В/В варьировалось в диапазоне от 0,57 до 0,67, а пропорция вяжущего и заполнителя была 1 к 8,6.

Характеристика вязкости разработанных инъекционных растворов свидетельствует об их высокой проникающей способности, т.к. время истечения исследуемых материалов через вискозиметр Марша для составов СВПС5 и СВПС6 составляет 39 и 33 секунды при В/В = 0,62 и расходе воды 140 л/м³ (табл. 8). При этом, согласно ГОСТ 59538-2021, все полученные растворы характеризуются маркой по удобоукладываемости П4 (осадка конуса больше 30 см). Начало схватывания составляет не менее 75 минут, что позволяет осуществлять эффективное закрепление грунтов.

Таблица 8 / Table 8

Показатели вязкости и водоотделения инъекционных растворов

Indices of viscosity and water separation of injection mortars

Состав Composition	Вязкость, с Viscosity, c	Водоотделение с течением времени в минутах, % Water segregation with the passage of time in minutes, %							
		15	30	45	60	75	90	120	230
СВПС1	37	0,4	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	6,5	12,5
СВПС 2	35	0,5	1,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	13,5
СВПС 3	32	1	2	3,5	4,8	5,9	6,7	7,9	14,0
СВПС 4	40	0,5	1	1,5	1,8	2,5	3,0	3,5	6,5
СВПС 5	39	1	1,5	2	2,5	3,0	3,3	3,6	7,5
СВПС 6	33	1,2	1,5	2,5	3,6	4,5	5	5,5	10,5

Составлено авторами / Compiled by the authors

Технологические свойства СВПС и динамика развития их плотности приведены в таблице 9.

Достижение равноподвижности СВПС (РК = 12–13 см) проводилось путем варьирования водовязующим отношением.

Таблица 9 / Table 9

Свойства смеси и развитие плотности
Mixture properties and density development

Состав <i>Compound</i>	Расплыв конуса, см <i>Cone spread, cm</i>	Средняя плотность смеси, кг/м ³ <i>Average density of the mixture, kg/m³</i>	Средняя плотность на 28 суток ($\Delta\rho^{28}$), кг/м ³ <i>Average density at 28 days ($\Delta\rho^{28}$), kg/m³</i>
СВПС1	12,4	2 318	2 228
СВПС2	12,1	2 318	2 232
СВПС3	12,2	2 318	2 230
СВПС4	13,2	2 307	2 271
СВПС5	13,1	2 307	2 264
СВПС6	13,2	2 307	2 262

Составлено авторами / Compiled by the authors

Отмечается увеличение средней плотности затвердевших образцов с применением вяжущих низкой водопотребности, а особенно, с ВНВ-50, что свидетельствует о повышении плотности упаковки кристаллических новообразований. Применение тонкомолотных композиционных вяжущих приводит к увеличению плотности цементного камня, что может быть полезным для улучшения механических свойств и прочности материала. Помимо этого, рост содержания высокоплотной фазы CSH(I) будет способствовать снижению объема гелевой субмикроструктуры.

Таблица 10 / Table 10

Прочностные свойства смесей с высокой проникающей способностью
Strength properties of mixtures with high penetration capability

Свойства <i>Properties</i>	СВПС1	СВПС2	СВПС3	СВПС4	СВПС5	СВПС6
Прочность на сжатие, МПа <i>Compressive strength, MPa</i> на 2 суток <i>on 2 days</i> на 7 суток <i>on 7 days</i> на 28 суток <i>on 28 days</i>	3,4 5,7 10,2	4,5 (+32 %) 6,8 (+19 %) 11,2 (+10 %)	4,6 (+35 %) 6,6 (+16 %) 11,1 (+9 %)	5,0 (+47 %) 7,0 (+23 %) 12,5 (+23 %)	5,3 (+56 %) 8,1 (+42 %) 13,3 (+31 %)	5,2 (+53 %) 7,2 (+26 %) 12,8 (+26 %)
$R_{сж}^2 / R_{сж}^{28}$	0,33	0,40	0,41	0,40	0,40	0,41
Прочность на растяжение при изгибе, МПа <i>Tensile strength at bending, MPa</i> на 2 суток <i>on 2 days</i> на 7 суток <i>on 7 days</i> на 28 суток <i>on 28 days</i>	0,4 0,6 1,1	0,5 (+25 %) 0,8 (+33 %) 1,3 (+18 %)	0,5 (+25 %) 0,7 (+14 %) 1,2 (+9 %)	0,6 (+50 %) 0,8 (+33 %) 1,4 (+27 %)	0,7 (+75 %) 0,9 (+50 %) 1,6 (45 %)	0,6 (+50 %) 0,8 (+33 %) 1,4 (+27 %)
$R_{из}^2 / R_{из}^{28}$	0,36	0,38	0,42	0,43	0,47	0,43
$R_{из}/R_{сж}, 2 \text{ сут.}$	0,12	0,11	0,11	0,12	0,13	0,12
$R_{из}/R_{сж}, 7 \text{ сут.}$	0,11	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11
$R_{из}/R_{сж}, 28 \text{ сут.}$	0,11	0,12	0,11	0,11	0,12	0,11

Составлено авторами / Compiled by the authors

Установлено, что эффект роста прочности на сжатие СВПС увеличивается при применении композиционного вяжущего (табл. 10). Максимальный эффект отмечается для значений ранней прочности, особенно в возрасте 2 суток. В частности, в возрасте 2 суток прочность на сжатие СВПС на ВНВ-50 возрастала на 56 % по сравнению с бездобавочным составом. Прочность на растяжение при изгибе также увеличивалась на 75 % в этом же возрасте. Это говорит о том, что вяжущее низкой водопотребности (включающее портландцемент, отходы ММС железистых кварцитов, ТВМ и ТУ) способствуют значительному повышению ранней прочности СВПС. Кроме того, отношение значений прочностных свойств во вторые сутки к аналогичным показателям в марочном возрасте также высоко. Для прочности на сжатие это отношение составляет 0,41 (по сравнению с 0,33 у контрольных составов), а для прочности на растяжение при изгибе — 0,47 (по сравнению с 0,36 у бездобавочных составов). Это подтверждает стабильность и сохранение высокой прочности СВПС с добавкой отходов мокрой магнитной сепарации, техногенных волокнистых материалов и технического углерода на протяжении всего периода эксплуатации. Высокая ранняя прочность разработанного СВПС позволяет эффективно использовать его для срочного строительства и комплексного ремонта покрытий дорожных одежд, где требуется быстрое создание и восстановление структурной прочности.

К семисуточному возрасту скорость роста прочности на сжатие исследуемого СВПС на КВ в некоторой степени стабилизируется, но все еще превышает значения контрольного состава до 42 %. При этом прочность на растяжение при изгибе превышает до 50 % значения для контрольного состава.

Интересно отметить, что отношение прочности на растяжение при изгибе и на сжатие в возрасте 7 суток (0,12) превышает аналогичную характеристику контрольного состава из портландцемента. Это происходит несмотря на замещение портландцементного клинкера до 59 мас. % отходами ММС железистых кварцитов, ТВМ и ТУ. Высокое значение этого отношения указывает на развитие трещиностойкости материала. Для рационально разработанного состава (СВПС5) отношение прочностей на растяжение при изгибе и на сжатие также повышается с возрастом: во вторые сутки составляет 0,13, в седьмые — 0,11, а в марочном возрасте — 0,12. Все эти значения не ниже, а зачастую и превосходят значения контрольных составов.

Выявлено, что материалы на основе КВ обладают более интенсивным набором прочности по сравнению с контрольными образцами из бездобавочного портландцемента. Это объясняется положительным влиянием поликарбоксилатного химического модификатора

и активных наполнителей, которые способствуют уменьшению водопотребности и ускорению гидратации алита и трехкальциевого алюмината, а также повышению тепловыделения. Суперпластификаторы позволяют снизить водопотребность материала, что ведет к улучшению его плотности и компактности. Это способствует более эффективной гидратации клинкерных минералов и формированию более прочной структуры. Кроме того, суперпластификаторы могут также влиять на реологические свойства материала, обеспечивая его более равномерное распределение и заполнение пустот. Полиминеральные компоненты, такие как отходы ММС железистых кварцитов, ТВМ и ТУ могут активно участвовать в гидратационных реакциях и пуццолановой реакции с клинкерными минералами. Это способствует более интенсивной гидратации и образованию дополнительных прочных продуктов гидратации.

Повышение плотности материала на композиционных вяжущих имеет положительное влияние на его эксплуатационные характеристики и долговечность. Снижение капиллярной пористости и проницаемости материала для жидкостей и газов приводит к следующим преимуществам:

1. Улучшенная водонепроницаемость: Уменьшение капиллярной пористости и проницаемости материала снижает возможность проникновения воды и влаги в его структуру. Это способствует улучшению водонепроницаемости и защите от влагообмена, что особенно важно для материалов, используемых в строительстве и ремонте автомобильных дорог, т. е. объектов, подверженных воздействию влаги.

2. Улучшенная устойчивость к химическому воздействию: Снижение проницаемости материала также означает, что он будет менее подвержен химическому воздействию различных агрессивных сред, таких как кислоты, щелочи и другие химически активные вещества. Это повышает устойчивость материала к коррозии и деградации.

3. Улучшенная механическая прочность: Уплотнение микроструктуры материала также может способствовать повышению его механической прочности. Уменьшение пористости и повышение плотности материала улучшает его способность сопротивляться воздействию внешних нагрузок и деформаций, что ведет к улучшению его прочностных свойств.

4. Улучшенная долговечность: Все вышеуказанные факторы — улучшенная водонепроницаемость, устойчивость к химическому воздействию и повышенная механическая прочность в комплексе позволяют рассчитывать на высокую долговечность материалов и конструкций, изготовленных из них.

Исследования характеристик показало, что физико-механические свойства СВПС, изготовленных на ВНВ-50, во всех случаях превышают характеристики образцов аналогичного состава, изготовленных на других вяжущих и таким образом, позволяет существенно снизить расход клинкерной составляющей.

Все разработанные инъекционные растворы показывают марку по морозостойкости F₂100.

Разработанные инъекционные растворы соответствуют требованиям ГОСТ 59538-2021 (табл. 11).

Таблица 11 / Table 11

Соответствие разработанных инъекционных растворов ГОСТ 59538-2021

Accordance of developed injection mortars GOST 59538-2021

Характеристика <i>Characteristic</i>	СВПС	ГОСТ 59538-2021
Удельная поверхность цемента, м ² /кг <i>Cement specific surface, m2/kg</i>	450	300–500
Класс прочности на сжатие <i>Compressive strength class</i>	B5–B10	B5–B20
Марка по удобоукладываемости <i>Workability grade</i>	П4 (осадка конуса больше 30 см) <i>(cone slump more than 30 cm)</i>	П1–П4
Водоотделение <i>Water separation</i>	≤ 8 %	2–8 %, время полного водоотделения более 30 мин (стабильные) <i>2–8 %, complete water gain time more than 30 min (stable)</i>
	≤ 16 %	8–16 %, время полного водоотделения 20–30 мин (условно-стабильные) <i>8–16 %, time of complete water gain 20–30 min (conditionally stable)</i>
Марка по водонепроницаемости <i>Water resistance grade</i>	W6–W16	W4–W12
Марка по морозостойкости <i>Frost resistance grade</i>	F ₂ 100	F15-200

Составлено авторами / Compiled by the authors

В связи с высокой интенсивностью движения на дорожном полотне, большое значение имеет изучение деформативных характеристик. Одной из основных характеристик деформирования бетона является модуль упругости, для определения которого испытывались призмы в 28-суточном возрасте в соответствии с требованиями ГОСТ 24452. Продольные деформации призм замерялись с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 мм, на основании чего рассчитывался модуль упругости (табл. 12).

Таблица 12 / Table 12

Деформативные свойства смесей высокой проникающей способности

Deformation properties of high penetration capability mixtures

Состав <i>Composition</i>	Модуль упругости, ГПа <i>Modulus of elasticity, GPa</i>	Призменная прочность, МПа <i>Prism strength, MPa</i>
СВПС1	4,21	7,82
СВПС2	6,36 (+51 %)	8,59 (+10 %)
СВПС3	6,11 (+45 %)	8,51 (+9 %)
СВПС4	7,37 (+76 %)	9,59 (+23 %)
СВПС5	8,92 (+112 %)	10,20 (+30 %)
СВПС6	7,02 (+67 %)	9,82 (+26 %)

Составлено авторами / Compiled by the authors

Исследования деформативных свойств СВПС, дают основание сделать вывод о том, что на основе щебня из метаморфических сланцев, возможно получение бетонов для дорожных оснований, соответствующих нормативной документации для данного вида строительства [26].

Установлено увеличение деформативных характеристик бетона на ВНВ-50 по сравнению с бетоном на цементе ЦЕМ I 42.5 Н на 112 %. Таким образом, доказана возможность получения бетона для оснований дорожных одежд за счет использования композиционных вяжущих и заполнителя из кристаллических сланцев. Установлено, что прочностные и деформативные свойства бетона с применением ВНВ-50 на основе ММС выше, чем у бетона контрольного состава на обычном портландцементе, что можно объяснить высокими характеристиками самого композиционного вяжущего (высокой дисперсности, низкой водопотребности, высокой активности) за счет чего улучшается состояние контактной зоны на границе раздела «цементный камень — заполнитель», а также состав и структура новообразований в этой зоне.

Анализ полученных данных показал, что использование отходов ММС железистых кварцитов в качестве мелкого заполнителя является эффективным при получении высокопроникающих смесей и позволяют получить широкую номенклатуру составов СВПС для устройства укрепленных оснований автомобильных дорог. Также целесообразно введение добавок суперпластификаторов, использование которых дает возможность получить одновременно два эффекта: увеличение подвижности бетонной смеси и повышение прочности бетона.²

На основе подобранных составов смесей с высокой проникающей способностью были проведены опыты по укреплению второго слоя щебеночного основания. Образцы формовались методом заливки

² Авилова, Е.Н. Дисперсно-армированный цементобетон на основе техногенного сырья для дорожного строительства / Е.Н. Авилова // Автореферат дисс. ... 05.23.05. — Белгород, 2013. — 23 с.

щебеночного каркаса в формах 15×15×15 см, состоящего из щебня фракции 40–70 мм (табл. 13, рис. 3).

Таблица 13 / Table 13

Физико-механические свойства щебня

Physical and mechanical properties of crushed stone

Наименование показателей <i>Indicators name</i>	Значение <i>Value</i>
Полные остатки на сите по массе, % d <i>Total residues on the sieve by mass, % d</i>	97,9
То же 0,5(d+D) <i>Same 0,5(d+D)</i>	67,3
То же D <i>Same D</i>	6,8
То же 1.25 D <i>Same 1.25 D</i>	0
Содержание зерен пластинчатой и игольчатой формы, % <i>Content of plate and acicular shaped grains, %</i>	45,2
Содержание глинистых и пылевидных частиц, % <i>Content of clay and flour particles, %</i>	0,5
Содержание глины в виде комков, % <i>Clay content in the form of lumps, %</i>	0
Содержание зерен слабых пород, % <i>Content of grains of soft rocks, %</i>	0
Марка щебня по прочности <i>Crushed stone grade by strength</i>	800
Морозостойкость, циклов <i>Frost resistance, cycles</i>	200
Насыпная плотность <i>Bulk density</i>	1,3
Класс щебня по содержанию радионуклидов <i>Crushed stone class by radionuclides content</i>	Первый <i>First</i>

Составлено авторами / Compiled by the authors



Рисунок 2. Образец дорожного основания, укрепленного СВПС (составлено авторами)

Figure 2. Roadbed sample reinforced with HPCM (compiled by the authors)

По результатам испытаний можно сделать вывод, что все значения прочности удовлетворяют требованиям для оснований автомобильных дорог II категории (табл. 14, 15).

Таблица 14 / Table 14

Физико-механические свойства укрепленных оснований

Physical and mechanical properties of reinforced bases

Вид вяжущего Type binder	Ориентир. расход СВПС на 1 м ² основания Approximate consumption of HPCM per 1 m ² of the base	Средняя плотность укрепленного основания, кг/м ³ Average density of reinforced base, kg/m ³	Предел прочности при сжатии, МПа Compressive strength compressive strength, MPa
СВПС1	100	2 278	15,3
СВПС2	100	2 282	16,5
СВПС3	100	2 280	16,7
СВПС4	100	2 321	20,6
СВПС5	100	2 314	20,7
СВПС6	100	2 312	19,7

Составлено авторами / Compiled by the authors

Таблица 15 / Table 15

Эксплуатационные характеристики бетона оснований

Performance characteristics of concrete bases

Вид вяжущего Type binder	Водопоглощение бетона по массе, W, % Water absorption of concrete by mass, W, %	Морозостойкость, F, циклов Frost resistance, F, cycles	Призменная прочность, МПа Prism strength, MPa	Модуль упругости, ГПа Elastic modulus, GPa
СВПС1	4,7	75	12,0	9,9
СВПС2	4,5	75	13,0	10,6
СВПС3	4,2	75	13,1	10,8
СВПС4	4,3	100	16,2	13,4
СВПС5	4,0	100	16,3	13,8
СВПС6	4,1	100	15,5	12,5

Составлено авторами / Compiled by the authors

Испытания образцов укрепленных щебеночных оснований на морозостойкость показали, что образцы всех подобранных составов на композиционном вяжущем выдержали без каких-либо внешних изменений 100 циклов попеременного замораживания и оттаивания (для контрольных составов на бездобавочном цементе 75 циклов) и характеризуются низкими показателями водопоглощения. Разработанные составы СВПС позволяют при укреплении щебеночных оснований получать бетоны класса В5–В10, и их можно использовать при устройстве оснований II категории автомобильных дорог [27; 28].

Выводы

Conclusions

Разработана широкая номенклатура СВПС из композиционных вяжущих, измельчённых до $S_{уд} = 500 \text{ м}^2/\text{кг}$. В качестве мелкого заполнителя применялся полифракционный отсев дробления сланцевого щебня с модулем крупности 2,7. Портландцемент замещался отходами ММС железистых кварцитов в количестве 50 мас. % при добавлении

5 мас. % ТВМ и 4 мас. % ТУ. В/В варьировалось в диапазоне от 0,57 до 0,67, а пропорция вяжущего и заполнителя была 1 к 8,6. Результаты комплексного исследования этих строительных материалов показали следующее:

1. Характеристика вязкости разработанных материалов свидетельствует об их высокой проникающей способности, т. к. время истечения исследуемых материалов через вискозиметр Марша для составов СВПС5 и СВПС6 составляет 39 и 33 секунды при В/В = 0,62 и расходе воды 140 л/м³. При этом, согласно ГОСТ 59538-2021, все полученные растворы характеризуются маркой по удобоукладываемости П4 (осадка конуса больше 30 см). Начало схватывания составляет не менее 75 минут, что позволяет осуществлять эффективное закрепление грунтов.

2. Установлено, что эффект роста прочности на сжатие СВПС увеличивается при применении композиционного вяжущего. В частности, в возрасте 2 суток прочность на сжатие СВПС на ВНВ-50 возрастала на 56 % по сравнению с бездобавочным составом.

3. Разработанные инъекционные растворы соответствуют требованиям ГОСТ 59538-2021: удельная поверхность цемента 450 м²/кг, классы прочности на сжатие — В5–В10, стабильные и условно-стабильные, марки по водонепроницаемости — W6–W16, марка по морозостойкости — F₂100.

4. Исследования деформативных свойств СВПС (модуль упругости 8,92 ГПа, призмная прочность 10,2 МПа), дают основание сделать вывод о том, что на основе щебня из метаморфических сланцев, возможно получение бетонов для дорожных оснований, соответствующих нормативной документации для данного вида строительства.

5. Разработанные составы СВПС позволяют при укреплении щебеночных оснований получать бетоны класса В5–В10, и их можно использовать при устройстве оснований II категории автомобильных дорог.

ЛИТЕРАТУРА

1. Решетова, Е.М. Главные условия развития дорожной сети России / Е.М. Решетова // Экономика строительства. — 2013. — № 4. — С. 12–23. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19124814>. — EDN QCNFLR. (дата обращения: 23.10.2023).
2. Костылев, В.А. Методы оценки технико-эксплуатационного состояния существующей дорожной сети России / В.А. Костылев // Научные труды SWorld. — 2015. — Т 1. — № 2. — С. 20–24. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23728711>. — EDN TZGQLH. (дата обращения: 23.10.2023).

3. **Епифанов, Ю.А.** О некоторых результатах исследования влияния дорожной сети на решение проблемы обеспечения безопасности на дорогах России / Ю.А. Епифанов // Вестник университета. — 2012. — № 4. — С. 24–29. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18386485>. — EDN PMJDKZ. (дата обращения: 23.10.2023).
4. **Степаненко, А.А.** Деформации и разрушения покрытий нежестких дорожных одежд автомобильных дорог / А.А. Степаненко // Актуальные проблемы автотранспортного комплекса: Межвузовский сборник научных статей (с международным участием) / Отв. ред. О.М. Батищева Самара: Самарский государственный технический университет, 2019. — С. 208–212. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39209362>. — EDN QHNPQM. (дата обращения: 23.10.2023).
5. **Клюев, С.В.** Основы конструктивной организации природных и искусственных материалов / С.В. Клюев // Современные технологии в промышленности строительных материалов и стройиндустрии: Сборник студенческих докладов посвященный 150-летию со дня рождения академика В.Г. Шухова в 3-х частях, Белгород, 01–20 мая 2003 года. Том Часть 1 / Белгород: Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова, 2003. — С. 161–163. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20349768>. — EDN RDIEBV. (дата обращения: 23.10.2023).
6. **Жалко, М.Е.** Неудовлетворительное состояние водоотвода, как причина разрушения дорожного покрытия / М.Е. Жалко // Стратегия устойчивого развития регионов России. — 2013. — № 15. — С. 153–157. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20930349>. — EDN RQAMOF. (дата обращения: 23.10.2023).
7. **Иванова, Л.А.** Композиционные составы для локализации очагов разрушения дорожного покрытия / Л.А. Иванова, В.А. Шевченко, В.П. Киселев. — Красноярск: СФУ, 2012. — 121 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005573790>. (дата обращения: 23.10.2023).
8. **Клюев, С.В.** Бетон для строительства оснований автомобильных дорог на основе сланцевого щебня / С.В. Клюев, Е.Н. Авилова // Вестник Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова. — 2013. — № 2. — С. 38–41. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18802915>. — EDN PVMBJ. (дата обращения: 26.10.2023).
9. **Белозеров, О.В.** Перспективы развития автомобильно-дорожной сети Российской Федерации до 2030 г. / О.В. Белозеров // Транспорт Российской Федерации. — 2012. — № 2. — С. 4–7. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17846701>. — EDN PAOALT. (дата обращения: 26.10.2023).
10. **Коломыцев, Д.А.** Экономические проблемы развития дорожного строительства в России / Д.А. Коломыцев // Современные технологии: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей победителей VIII Международной научно-практической конференции, Пенза, 23 июня 2017 года / Пенза: "Наука и Просвещение", 2017. — С. 99–101. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29398570>. — EDN YTIOCH. (дата обращения: 26.10.2023).
11. **Астахов, И.Г.** Дорожные технологии в России выходят на новый уровень / И.Г. Астахов // Транспорт Российской Федерации. — 2017. — № 4. — С. 7–8. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29899110>. — EDN ZEHINR. (дата обращения: 26.10.2023).
12. **Основы рационального освоения недр КМА / В.З. Валитов, В.И. Дренин, Ю.И. Дудкин [и др.].** — Воронеж: Воронежский государственный университет, 1991. — 176 с. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21121954>. — EDN RUFMYL. (дата обращения: 26.10.2023).
13. **Комплексное использование нерудных пород КМА при реализации программы индивидуального жилищного строительства Белгородской области / М.М. Косухин, О.Н. Шарапов, М.А. Шугаева, Ю.А. Шарапова** // Современные проблемы науки и образования. — 2015. — № 2-1. — С. 213. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24123046>. — EDN UHWZUP. (дата обращения: 26.10.2023).
14. **Создание грунтобетона и укрепление оснований с применением отходов горнодобычи / Л.В. Закревская, А.А. Гавриленко, И.Р. Капуш, П.А. Любин.** — DOI <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-3-35-44> // Строительные материалы и изделия. — 2022. — Т 5. — № 3. — С. 35–44. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49758224>. — EDN PBHRVQ. (дата обращения: 26.10.2023).
15. **Махортов, Д.С.** Вяжущие композиции на основе портландцемента и вулканического пепла / Д.С. Махортов, Л.Х. Загороднюк, Д.А. Сумской. — DOI <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-4-30-38> // Строительные материалы и изделия. — 2022. — Т 5. — № 4. — С. 30–38. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49755696>. — EDN OSQSVJ. (дата обращения: 04.11.2023).

16. Коэффициент надежности по материалу для фибробетона / С.В. Ключев, Н.Ф. Кашапов, О.В. Радайкин [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-2-51-58> // Строительные материалы и изделия. — 2022. — Т 5. — № 2. — С. 51–58. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49755737>. — EDN QVQYPJ. (дата обращения: 04.11.2023).
17. **Moasas, A.M.** A worldwide development in the accumulation of waste tires and its utilization in concrete as a sustainable construction material: A review / A.M. Moasas, M.N. Amin, A. Ahmad [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01677> // Case Studies in Construction Materials. — 2022. — Т 17. — С. e01677. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509522008099>. (дата обращения: 04.11.2023).
18. **Al-Subari, L.** The utilization of waste rubber tire powder to improve the mechanical properties of cement-clay composites / L. Al-Subari, A. Ekinici, E. Aydin. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124306> // Construction and Building Materials. — 2021. — Т 300. — С. 124306. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061821020651>. (дата обращения: 04.11.2023).
19. **Xu, J.** High-value utilization of waste tires: A review with focus on modified carbon black from pyrolysis / J. Xu, J. Yu, G. Li [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140235> // Science of The Total Environment. — 2020. — Т 742. — С. 140235. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720337566>. (дата обращения: 04.11.2023).
20. **Hittini, W.** Utilization of devulcanized waste rubber tire in development of heat insulation composite / W. Hittini, A.-H.I. Mourad, B. Abu-Jdayil. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124492> // Journal of Cleaner Production. — 2020. — Т 280, Part 2. — С. 124492. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620345364>. (дата обращения: 04.11.2023).
21. **Siddika, A.** Properties and utilizations of waste tire rubber in concrete: A review / A. Siddika, Md.A. Al Mamun, H. Alabduljabbar [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.108> // Construction and Building Materials. — 2019. — Т 224. — С. 711–731. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819317799>. (дата обращения: 04.11.2023).
22. **Karthikeyan, B.** Effect of dumped iron ore tailing waste as fine aggregate with steel and basalt fibre in improving the performance of concrete / B. Karthikeyan, R. Kathiyayini, S.S. Kumaran [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.906> // Materials Today: Proceedings. — 2021. — Т 46, Part 17. — С. 7624–7632. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785321010038>. (дата обращения: 06.11.2023).
23. **Binici, H.** Durability of concrete made with natural granular granite, silica sand and powders of waste marble and basalt as fine aggregate / H. Binici, O. Aksogan. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.04.022> // Journal of Building Engineering. — 2018. — Т 19. — С. 109–121. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710217304771>. (дата обращения: 06.11.2023).
24. **Iftikhar, B.** Experimental study on the eco-friendly plastic-sand paver blocks by utilising plastic waste and basalt fibers / B. Iftikhar, S.C. Alih, M. Amran [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17107> // Heliyon. — 2023. — Т 9. — № 6. — С. E17107. — URL: [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(23\)04315-3](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(23)04315-3). (дата обращения: 06.11.2023).
25. **Boğa, A.R.** The effect of waste marble and basalt aggregates on the fresh and hardened properties of high strength self-compacting concrete / A.R. Boğa, A.F. Şenol. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129715> // Construction and Building Materials. — 2022. — Т 363. — С. 129715. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061822033712>. (дата обращения: 06.11.2023).
26. **Zhou, H.** A novel energy-absorbing composite structure with layers of basalt fiber fabric constraining waste brick particles and foam concrete / H. Zhou, H. Yu, N. Shi [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131579> // Construction and Building Materials. — 2023. — Т 387. — С. 131579. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061823012928>. (дата обращения: 06.11.2023).
27. **Юмашев, В.М.** Международный опыт строительства дорог с цементобетонными покрытиями / В.М. Юмашев, И.В. Басурманова // Автомобильные дороги. — 1995. — № 10-11. — С. 8–11.

28. **Granger, L.P.** Effect of Composition on Basic Creep of Concrete and Cement Paste / L.P. Granger, Z.P. Bazant. — DOI [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1995\)121:11\(1261\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1995)121:11(1261)) // Journal of Engineering Mechanics. — 1995. — Т 121. — № 11. — С. 162–168. — URL: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9399%281995%29121%3A11%281261%29>. (дата обращения: 06.11.2023).

Сведения об авторах:

Золотарева Светлана Васильевна — аспирант, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова», Белгород, Россия, e-mail: svet.zolotarewa2012@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7540-8164>

Алюбов Нарман Алюбович — кандидат экономических наук, доцент, ФГБУН «Комплексный научно-исследовательский институт имени Х.И. Ибрагимова Российской академии наук», Грозный, Россия, e-mail: yrekly@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8129-9598>

Федюк Роман Сергеевич — доктор технических наук, доцент, советник РААСН, профессор, ФГОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия, e-mail: roman44@ua.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2279-1240>

Клюев Сергей Васильевич — доктор технических наук, доцент, профессор, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова», Белгород, Россия, e-mail: klyuyev@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3217-6874>

Лисейцев Юрий Леонидович — соискатель, ФГОУ ВО «Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема», Биробиджан, Россия, e-mail: y.liss@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4515-6880>

Статья получена: 22.12.2023. Принята к публикации: 19.03.2024. Опубликовано онлайн: 02.04.2024.

REFERENCES

1. Reshetova E.M. [The main conditions for the development of the Russian road network]. *Construction Economy*. 2013; (4): 12–23. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19124814> (accessed 23rd October 2023). (In Russ.).
2. Kostylev V.A. [Methods for assessing the technical and operational condition of the existing road network in Russia]. *Scientific papers SWorld*. 2015; 1(2): 20–24. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23728711> (accessed 23rd October 2023). (In Russ.).
3. Epifanov Yu.A. [On some results of a study of the influence of the road network on solving the problem of ensuring safety on Russian roads]. *Vestnik Universiteta*. 2012; (4): 24–29. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18386485> (accessed 23rd October 2023). (In Russ.).
4. Stepanenko A.A. [Deformation and destruction of non-rigid road pavements of highways]. In: [Current problems of the motor transport complex: Interuniversity collection of scientific articles (with international participation)]. Samara: Samara Polytech; 2019. p. 208–212. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39209362> (accessed 23rd October 2023). (In Russ.).
5. Klyuyev S.V. [Fundamentals of the constructive organization of natural and artificial materials]. In: [Modern technologies in the building materials and construction industry: Collection of student reports dedicated to the 150th anniversary of the birth of academician V.G. Shukhov in 3 parts, Belgorod, May 01–20, 2003. Volume Part 1]. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; 2003. p. 161–163. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20349768> (accessed 23rd October 2023). (In Russ.).
6. Zhalko M.E. [Unsatisfactory condition of drainage as a cause of road pavement destruction]. *Strategiya ustoychivogo razvitiya regionov Rossii*. 2013; (15): 153–157. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20930349> (accessed 23rd October 2023). (In Russ.).

7. Ivanova L.A., Shevchenko V.A., Kiselev V.P. [Composite compositions for localizing areas of road pavement destruction]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2012. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005573790> (accessed 23rd October 2023). (In Russ.).
8. Klyuyev S.V., Avilova E.N. [Concrete for the construction of highway foundations based on shale crushed stone]. *Bulletin of BSTU Named After V.G. Shukhov*. 2013; (2): 38–41. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18802915> (accessed 26th October 2023). (In Russ.).
9. Belozеров O.V. [Prospects for the development of the road network of the Russian Federation until 2030]. *Transport of the Russian Federation. A magazine of science, economy and practice*. 2012; (2): 4–7. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17846701> (accessed 26th October 2023). (In Russ.).
10. Kolomytsev D.A. Economic Problems of Road Construction in Russia. In: [*Modern technologies: current issues, achievements and innovations: a collection of articles by the winners of the VIII International Scientific and Practical Conference, Penza, June 23, 2017*]. Penza: "Nauka i Prosveshcheniye"; 2017. p. 99–101. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29398570> (accessed 26th October 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
11. Astakhov I.G. Road Technologies in Russia Rise to a New Level. *Transport of the Russian Federation. A magazine of science, economy and practice*. 2017; (4): 7–8. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29899110> (accessed 26th October 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
12. Valitov V.Z., Drenin V.I., Dudkin Yu.I. et al. [Fundamentals of rational development of subsoil of the KMA]. Voronezh: Voronezh State University; 1991. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21121954> (accessed 26th October 2023). (In Russ.).
13. Kosukhin M.M., Sharapov O.N., Shugaeva M.A., Sharapova Yu.A. Complex Use of Non-Metallic Measures of KMA During Realization of The Programme of Private Housing Projects in Belgorod Region. *Modern problems of science and education*. 2015; (2-1): 213. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24123046> (accessed 26th October 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
14. Zakrevskaya L.V., Gavrilenko A.A., Kapush I.R., Lyubin P.A. Creating Ground Concrete and Strengthening Substrates Using Mining Waste. *Construction Materials and Products*. 2022; 5(3): 35–44. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-3-35-44>.
15. Makhortov D.S., Zagorodnyuk L.Kh., Sumskey D.A. Binder Compositions Based on Portland Cement and Volcanic Ash. *Construction Materials and Products*. 2022; 5(4): 30–38. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-4-30-38>.
16. Klyuev S.V., Kashapov N.F., Radaykin O.V. et al. The Reliability Coefficient for Fibre Concrete Material. *Construction Materials and Products*. 2022; 5(2): 51–58. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-2-51-58>.
17. Moasas A.M., Amin M.N., Ahmad A. et al. A worldwide development in the accumulation of waste tires and its utilization in concrete as a sustainable construction material: A review. *Case Studies in Construction Materials*. 2022; 17: e01677. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01677>.
18. Al-Subari L., Ekinici A., Aydın E. The utilization of waste rubber tire powder to improve the mechanical properties of cement-clay composites. *Construction and Building Materials*. 2021; 300: 124306. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124306>.
19. Xu J., Yu J., Li G. et al. High-value utilization of waste tires: A review with focus on modified carbon black from pyrolysis. *Science of The Total Environment*. 2020; 742: 140235. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140235>.
20. Hittini W., Mourad A.-H.I., Abu-Jdayil B. Utilization of devulcanized waste rubber tire in development of heat insulation composite. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 280, Part 2: 124492. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124492>.
21. Siddika A., Al Mamun Md.A., Alabduljabbar H. et al. Properties and utilizations of waste tire rubber in concrete: A review. *Construction and Building Materials*. 2019; 224: 711–731. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.108>.
22. Karthikeyan B., Kathyayini R., Kumaran S.S. et al. Effect of dumped iron ore tailing waste as fine aggregate with steel and basalt fibre in improving the performance of concrete. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 46, Part 17: 7624–7632. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.906>.

23. Binici H., Aksogan O. Durability of concrete made with natural granular granite, silica sand and powders of waste marble and basalt as fine aggregate. *Journal of Building Engineering*. 2018; 19: 109–121. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.04.022>.
24. Iftikhar B., Alih S.C., Amran M. et al. Experimental study on the eco-friendly plastic-sand paver blocks by utilising plastic waste and basalt fibers. *Heliyon*. 2023; 9(6): E17107. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17107>.
25. Boğa A.R., Şenol A.F. The effect of waste marble and basalt aggregates on the fresh and hardened properties of high strength self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 2022; 363: 129715. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129715>.
26. Zhou H., Yu H., Shi N. et al. A novel energy-absorbing composite structure with layers of basalt fiber fabric constraining waste brick particles and foam concrete. *Construction and Building Materials*. 2023; 387: 131579. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131579>.
27. Yumashev V.M., Basurmanova I.V. Mezhdunarodnyy opyt stroitel'stva dorog s tsementobetonnyimi pokrytiyami [International experience in the construction of roads with cement concrete pavements]. *Avtomobil'nyye dorogi* [Car roads]. 1995; (10-11): 8–11. (In Russ.)
28. Granger L.P., Bazant Z.P. Effect of Composition on Basic Creep of Concrete and Cement Paste. *Journal of Engineering Mechanics*. 1995; 121(11): 162–168. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1995\)121:11\(1261\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1995)121:11(1261)).

Information about the authors:

Svetlana V. Zolotareva — Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, e-mail: svet.zolotarewa2012@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7540-8164>

Narman A. Ayubov — Comprehensive Research Institute named after H.I. Ibragimov of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Russia, e-mail: yrekly@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8129-9598>

Roman S. Fediuk — Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia, e-mail: roman44@ya.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2279-1240>

Sergey V. Klyuev — Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, e-mail: klyuyev@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2279-1240>

Yury L. Liseitsev — Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan, Russia, e-mail: y.liss@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4515-6880>

Submitted: 22nd December 2023. Revised: 19th March 2024. Published online: 2nd April 2024.