

Научная статья

УДК 691

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-4/96-112>

## Смеси высокой проникающей способности для оснований дорожных одежд

Сергей Васильевич Ключев<sup>1</sup>, Светлана Васильевна Золотарева<sup>1</sup>, Нарман Аюбович Аюбов<sup>2</sup>, Роман Сергеевич Федюк<sup>3,4</sup>✉, Юрий Леонидович Лисейцев<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия

<sup>2</sup> Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук, г. Грозный, Россия

<sup>3</sup> Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

<sup>4</sup> Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия

<sup>5</sup> Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан, Россия

✉ [fedyuk.rs@dvfu.ru](mailto:fedyuk.rs@dvfu.ru)

**Аннотация.** Состояние отечественной дорожной сети требует значительного количества строительных и ремонтных мероприятий, в том числе направленных на повышение долговечности оснований дорожных одежд. Разработана широкая номенклатура смесей высокой проникающей способности (СВПС) из композиционных вяжущих, измельчённых до  $S_{уд} = 500 \text{ м}^2/\text{кг}$ , получаемых на основе ЦЕМ I 42.5 Н ЗАО «Белгородский цемент», частично замещенного техногенными ресурсами с добавкой суперпластификатора Полипласт ПФК-НЛМ. Характеристика вязкости разработанных смесей свидетельствует об их высокой проникающей способности, так как время истечения исследуемых материалов через вискозиметр Марша при  $V/V=0,62$  и расходе воды  $140 \text{ л/м}^3$  составляет 33–39 секунд. Начало схватывания составляет не менее 75 минут, что позволяет осуществлять эффективное закрепление оснований дорожных одежд. Композиционное вяжущее способствует значительному повышению ранней прочности СВПС на сжатие (до 56% по сравнению с контрольным составом) и на изгиб (до 75%). Отношение прочности на растяжение при изгибе и на сжатие разработанных составов (во вторые сутки составляет 0,13, в седьмые – 0,11, а в 28-е – 0,12) зачастую превышает аналогичную характеристику контрольного состава, несмотря на замещение портландцемента более 50 мас. % отходами мокрой магнитной сепарации (ММС) железистых кварцитов, ТВМ и СП, что указывает на развитие трещиностойкости материала. Установлено увеличение деформативных характеристик затвердевшей на КВ-50СП+1%ТВМ по сравнению со смесью на цементе ЦЕМ I 42.5 Н на 112%. Исследования деформативных свойств смесей позволяют сделать вывод о том, что на основе разработанных СВПС и щебня из метаморфических сланцев возможно получение бетонов для дорожных оснований, соответствующих нормативной документации для данного вида строительства. Испытания образцов укрепленных щебеночных оснований на весь комплекс физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик показали, что разработанные составы СВПС позволяют при укреплении щебеночных оснований получать бетоны класса В5–В10, и их можно использовать при устройстве оснований II категории автомобильных дорог.

**Ключевые слова:** материал, дорога, покрытие, основание, смесь

**Для цитирования:** Ключев С.В., Золотарева С.В., Аюбов Н.А., Федюк Р.С., Лисейцев Ю.Л. Смесей высокой проникающей способности для оснований дорожных одежд // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2024. № 1(58). С. 96–112.

Original article

## High penetrating mixtures for road bases

Sergey V. Klyuyev<sup>1</sup>, Svetlana V. Zolotareva<sup>1</sup>, Narman A. Ayubov<sup>2</sup>,  
Roman S. Fediuk<sup>3,4</sup>✉, Yury L. Liseitsev<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Belgorod State Technological University named after V.G. Shoukhov, Belgorod, Russia

<sup>2</sup> Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Russia

<sup>3</sup> Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

<sup>4</sup> Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

<sup>5</sup> Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan, Russia

✉ fedyuk.rs@dvfu.ru

**Abstract.** The state of the Russia road network requires a significant number of construction and repair measures, including those aimed at increasing the durability of road bases. A wide range of high penetrating mixtures (HPM) has been developed from composite binders (CB), crushed to  $S_{sp} = 500 \text{ m}^2/\text{kg}$ , obtained on the basis of CEM I 42.5 N of Belgorod Cement, partially replaced by technogenic resources with the addition of the superplasticizer Poliplast PFK-NLM. The viscosity characteristics of the developed mixtures indicate their high penetrating ability, because the flow time of the studied materials through the Marsh viscometer at  $V/B = 0.62$  and a water flow rate of  $140 \text{ l/m}^3$  is 33-39 seconds. The onset of setting is at least 75 minutes, which allows for effective fastening of road pavement bases. The composite binder contributes to a significant increase in the early compressive strength of HPM (up to 56% compared to the control composition) and flexural strength (up to 75%). The ratio of tensile strength in bending and compression one of the developed compositions (on the second day is 0.13, on the seventh one is 0.11, and at grade age is 0.12) often exceeds the similar characteristic of the control composition, despite the replacement of Portland cement by more than 50 wt. % of waste from wet magnetic separation (WMS) of ferruginous quartzites, technogenic fibrous materials (TFM) and superplasticizer (SP), which indicates the development of crack resistance of the material. It was established that the deformation characteristics of the mixture hardened with CB-50SP + 1% TFM increased by 112% compared to the mixture with CEM I 42.5 N cement. Studies of the deformative properties of mixtures allow to conclude that, based on the developed HPM and crushed stone from metamorphic shales, it is possible to obtain concrete for road foundations that comply with the regulatory documentation for this type of construction. Testing of samples of reinforced crushed stone foundations for the entire range of physical and mechanical properties and operational characteristics showed that the developed HPM compositions make it possible to obtain class B5 – B10 concrete when strengthening crushed stone foundations, and they can be used in the construction of foundations of category II highways

**Keywords:** material, road, coating, base, mixture

**For citation:** Klyuyev S.V., Zolotareva S.V., Ayubov N.A., Fediuk R.S., Liseitsev Y.L. High penetrating mixtures for road bases. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2024, no. 1(58), pp. 96–112. (In Russ.).

### 1. Введение

Россия является самой крупной по территории страной в мире, поэтому обеспечение эффективной логистики, включая пассажиро- и товаропоток, является важнейшей государственной задачей. Несмотря на это, состояние отечественной дорожной сети требует значительного количества строительных и ремонтных мероприятий.

Проектирование автомобильных дорог (АД) производится по ГОСТ Р 50597-2017, ГОСТ 33151 и СП 78.13330.2012. Дорожные одежды имеют конструктивные слои, которые выполняют различные функции. Важное значение имеет основание, на котором располагаются остальные слои, так как при малейшей деформации основания происходит медленное, но необратимое разрушение всей дорожной конструкции.

Основание – слой, который совместно с дорожным покрытием перераспределяет и снижает давление от шин транспортных средств, передавая его на нижележащие слои основания или непосредственно на грунт земляного полотна. Основание может быть выполнено из таких материалов, как гравий, песок, щебень и др., и имеет специальную структуру для обеспечения оптимальной прочности и устойчивости.

Цементогрунтовые однослойные основания и покрытия автомобильных дорог во II и III дорожно-климатических зонах (ДКЗ) устраиваются из портландцемента классом не ниже 32.5 для покрытий и не ниже 22.5 для оснований [5, 23–24].

Нижний слой оснований во II – V ДКЗ устраивается с использованием грунтов, укрепленных цементом марки не ниже 200; а на дорогах III категории могут быть использованы магнезиальные портландцементы, шлаковые магнезиальные и другие цементы марки 300 [1, 22, 25].

Зарубежные конструктивные слои дорожных одежд магистральных автомобильных дорог имеют ряд отличительных особенностей:

- основания возводятся в основном из укрепленных каменных материалов, при этом укрепленный грунт используется исключительно в нижних слоях оснований [4, 21];

- функции вяжущих зачастую выполняют не только такие традиционные материалы, как цемент и битум, но и местные низкоактивные ресурсы – гранулированный доменный шлак, шлаковая мука, зола-уноса [2, 20];

- возведение оснований дорожных одежд из бетона класса выше B10 неэкономично, поэтому для них применяется тощий бетон или каменные материалы, которые укрепляются цементом (до 5 мас. %) [6, 19];

- устройство верхних слоев оснований дорожных одежд осуществляется в основном с применением каменных материалов, которые укреплены органическими вяжущими веществами. Поэтому общая толщина слоев с битумным вяжущим (покрытие + верхний слой основания) достигает (а иногда и превосходит) 20 см [7, 18];

- использование укрепленных материалов открывает возможность применять местные относительно низкопрочные каменные дорожно-строительные ресурсы, которые без осуществления укрепления неприменимы для создания оснований дорог высших категорий [8, 17].

Основание из каменных материалов, укрепленных органическими вяжущими, может быть осуществлено различными методами: из горячего асфальтобетона (черного щебня), путем смешивания на АД щебня (гравия) с битумом (или битумной эмульсией с портландцементом). пропиткой щебеночного слоя битумом или вяжущими на его основе [9, 16].

Широко распространены в дорожном строительстве основания одежд из материалов с применением цемента, что обусловлено использованием местных каменных материалов и грунтов, то есть ресурсов, которые не применяются без укрепления на автомобильных дорогах выше IV категории [10, 15, 28]. Для создания оснований с использованием щебня перспективными являются смеси высокой проникающей способности (СВПС) на основе местного природного и техногенного сырья.

Поскольку в Белгородской области отсутствуют месторождения гранита и постоянно возрастает стоимость его транспортировки из других регионов, а также отмечается повышение цен на битум, возникает мысль о массовом устройстве укрепленных оснований дорожных одежд, что обеспечит снижение до минимума ресурсоемкости дорожных одежд с одновременной утилизацией местных техногенных песков и метаморфических сланцев. В данной работе предлагается кроме утилизации техногенного сырья использовать разработанные композиционные вяжущие с целью снижения стоимости цементобетона.

Цель статьи заключается в разработке и комплексном исследовании смесей высокой проникающей способности для оснований дорожных одежд. Задачами по достижению поставленной цели являются: проектирование состава СВПС, исследование их технологических и физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик укрепленных оснований.

## 2. Материалы и методы

Разработана широкая номенклатура СВПС из композиционных вяжущих, измельчённых до  $S_{уд} = 500 \text{ м}^2/\text{кг}$ , получаемых на основе ЦЕМ I 42.5 Н ЗАО «Белгородский цемент», частично замещенного техногенными ресурсами с добавкой суперпластификатора Полипласт ПФК-НЛМ. Отходы мокрой магнитной сепарации (ММС) железистых кварцитов представляют собой техногенный тонкодисперсный песок темно-серого цвета, состоящий из неокатанных частичек кварца (около 60%), полевых шпатов, амфиболов, карбонатов, магнетита, гематита и их агрегатов. В качестве компонентов вяжущего применялись техногенные волокнистые материалы (ТВМ), представляющие собой отходы базальтового производства (минеральной ваты «Извол»). 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. % и 60 мас. % при добавлении 1 мас. % ТВМ и 0,6 мас. % СП. В/В изменялось в диапазоне от 0,57 до 0,67, а пропорция вяжущего и заполнителя была 1 к 8,6.

Удельная поверхность сыпучего сырья исследовалась с применением прибора ПСХ-11. Удобоукладываемость бетонных смесей определялась с применением стандартного конуса по величине расплыва. Вязкость определялась временем истечения раствора через вискозиметр Марша. Значение средней плотности образцов вычислялось делением массы на объем. Прочность на сжатие определялась по стандартной методике ГОСТ 310.4-81 на кубах с ребром 70 мм. Прочность на растяжение при изгибе определялась трехточечным методом на образцах призматической формы 40×40×160 мм на прессе SHIMADZU. Модуль упругости высчитывался по формуле

$$E_{\sigma} = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_{1y}}, \tag{1}$$

где  $\sigma_1$  – приращение напряжения вплоть до 30%-ного значения от разрушающей нагрузки;  $\varepsilon_{1y}$  – прирост деформации образца, соответствующее уровню нагрузки  $P_l = 0,3P_p$ ;  $P_p$  – разрушающая нагрузка;  $P_l$  – соответствующий прирост внешней нагрузки.

Механические свойства закрепленного основания (прочность на сжатие и модуль деформации) оценивались на образцах-цилиндрах.

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.

## 3. Результаты и дискуссия

### 3.1. Разработка составов и исследование свойств СВПС

Разработанные составы СВПС из композиционных вяжущих, измельчённых до  $S_{уд} = 500 \text{ м}^2/\text{кг}$ , приведены в табл. 1.

Таблица / Table 1

**Состав смесей высокой проникающей способности**  
Composition of mixtures of high penetrating ability

№ состава (используемое вяжущее)	Расход, кг на 1 м <sup>3</sup>					В/В
	вяжущее	отсев щебня	песок	вода	СП	
СВПС1(ЦЕМ I 42.5 Н)	225	1320	620	128	1,35	0,57
СВПС 2(ЦЕМ I 42.5 Н+1%ТВМ)	225	1320	620	128	1,35	0,57
СВПС 3(ЦЕМ I 42.5 Н+СП+1%ТВМ)	225	1320	620	128	1,35	0,57
СВПС4 (КВ-50СП)	225	1320	620	140	1,35	0,62
СВПС5 (КВ-50+1%ТВМ)	225	1320	620	140	1,35	0,62
СВПС6 (КВ-50СП +1%ТВМ)	225	1320	620	140	1,35	0,62
СВПС7 (КВ-60СП)	225	1320	620	151	1,35	0,67
СВПС8 (КВ-60+1%ТВМ)	225	1320	620	151	1,35	0,67
СВПС9 (КВ-60СП +1%ТВМ)	225	1320	620	151	1,35	0,67

Характеристика вязкости разработанных инъекционных растворов свидетельствует об их высокой проникающей способности, так как время истечения исследуемых материалов через вискозиметр Марша для составов СВПС5 и СВПС6 составляет 39 и 33 секунды при  $V/B=0,62$  и расходе воды  $140 \text{ л/м}^3$  (рис. 1). Достижение равноподвижности СВПС (РК=12–13 см) проводилось путем варьирования водовязущим отношением. 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 оснований дорожных одежд.

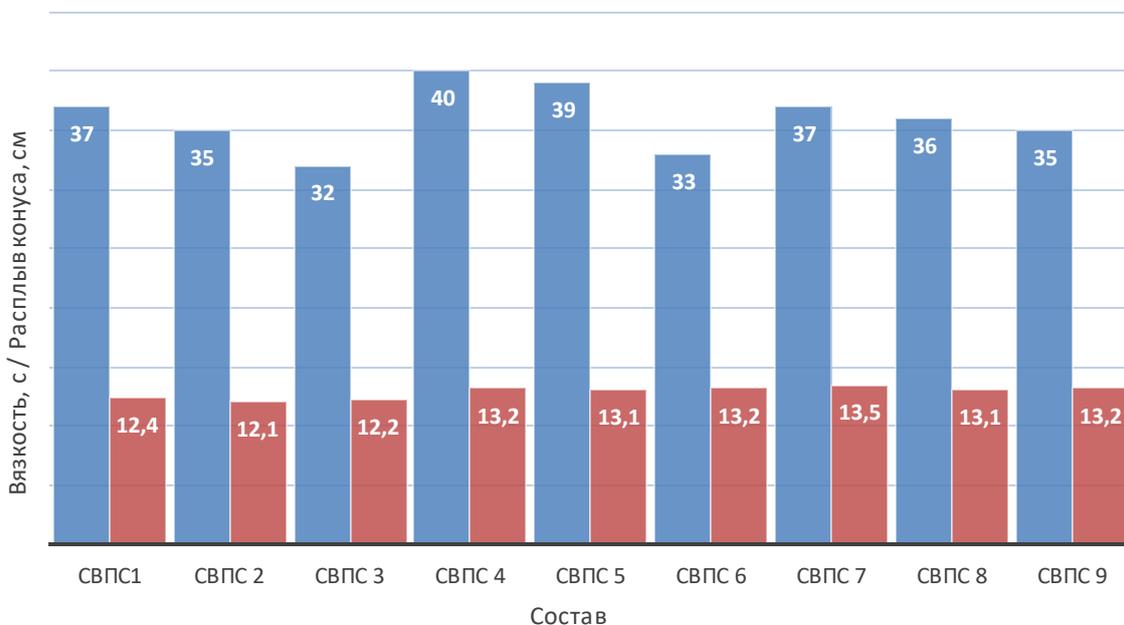


Рис. 1. Характеристики подвижности разработанных смесей

Fig. 1. Flowability characteristics of the developed mixtures

Установлено низкое водоотделение – до 14% через 230 минут (рис. 2). Соответственно, данные материалы являются эффективными для строительства оснований дорожных одежд.

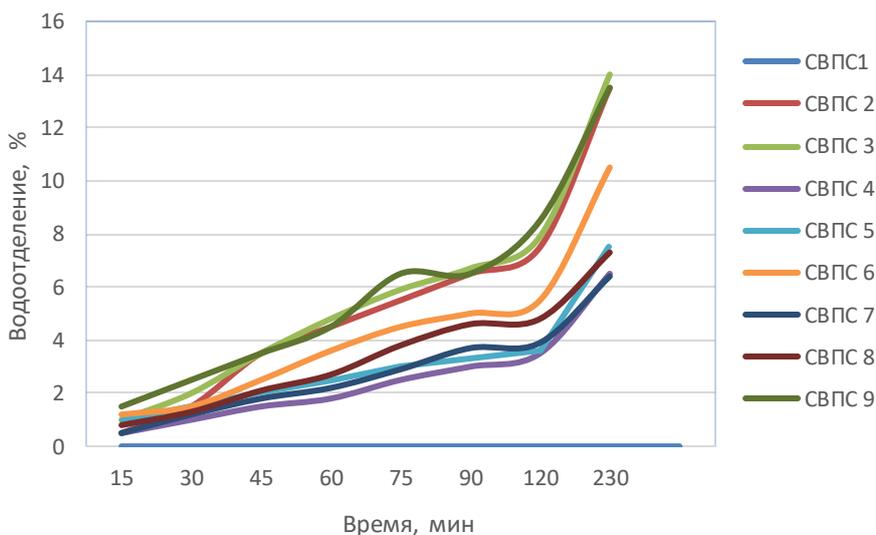
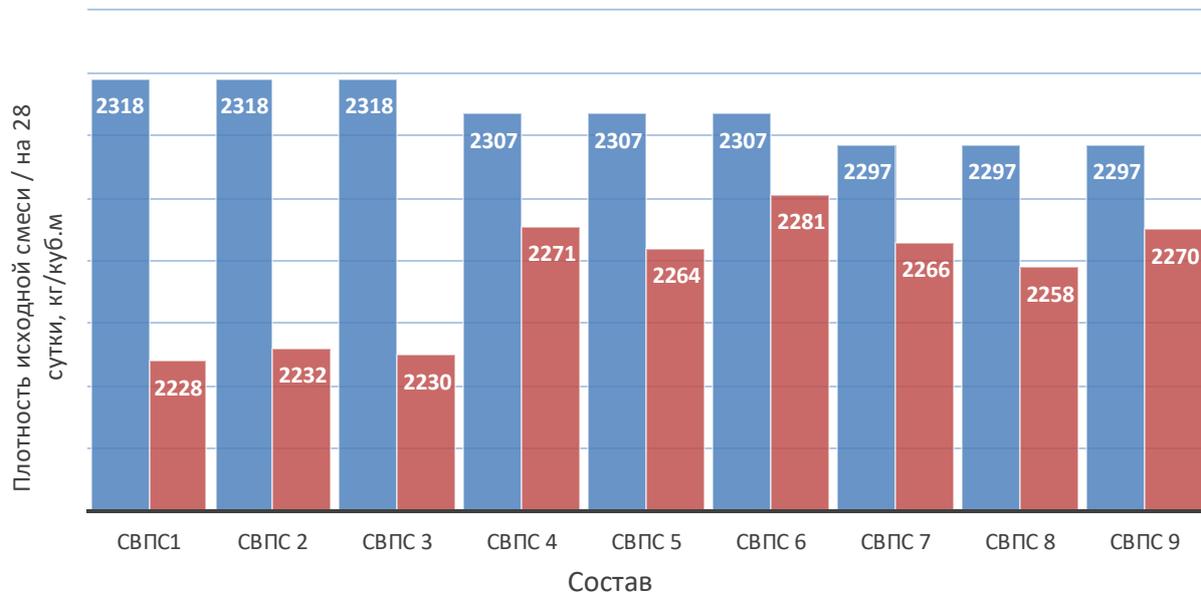


Рис. 2. Водоотделение составов с течением времени

Fig. 2. Water separation of compounds over time

Изменение плотности СВПС приведено в табл. 3.

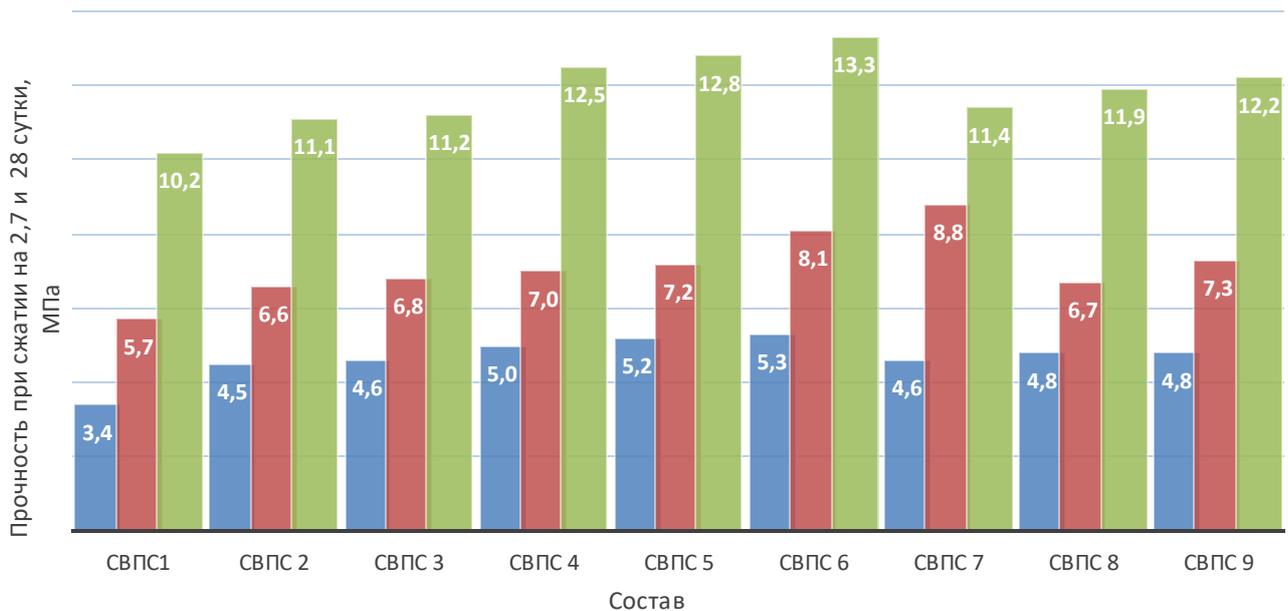


**Рис. 3. Изменение плотности материала**

Fig. 3. Changing material density

Отмечается увеличение средней плотности затвердевших образцов с применением композиционных вяжущих, особенно в присутствии минерального модификатора, 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 субмикropористости.

Установлено, что эффект роста прочности при сжатии СВПС увеличивается с применением композиционного вяжущего (рис. 4). Максимальный эффект отмечается для значений ранней прочности, особенно в возрасте 2 суток. В частности, в возрасте 2 суток прочность при сжатии СВПС на КВ-50 с использованием суперпластификатора и минерального модификатора возрастала на 56% по сравнению с бездобавочным составом.



**Рис. 4. Изменение прочности при сжатии СВПС**

Fig. 4. Change in compressive strength of HPM

Прочность на растяжение при изгибе также увеличивалась на 75% в этом же возрасте (рис. 5). Это говорит о том, что композиционное вяжущее (включающее портландцемент, отходы ММС железистых кварцитов, ТВМ и СП) способствует значительному повышению ранней прочности СВПС.

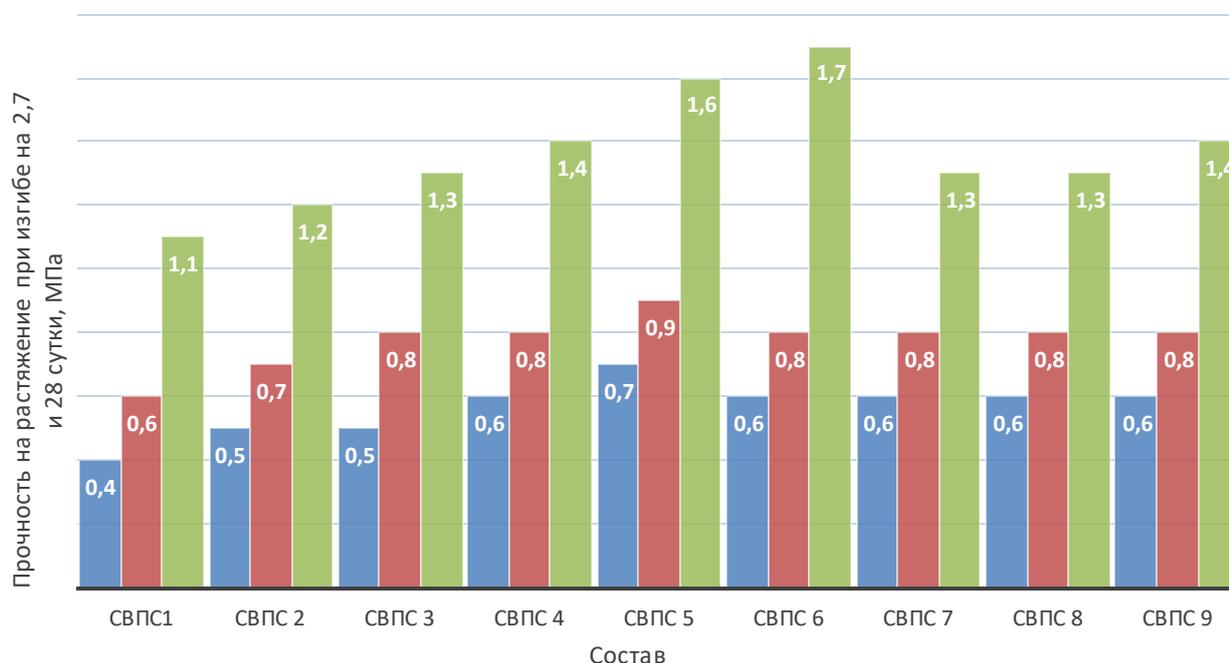


Рис. 5. Изменение прочности на растяжение при изгибе СВПС

Fig. 5. Change in tensile strength during bending of HPM

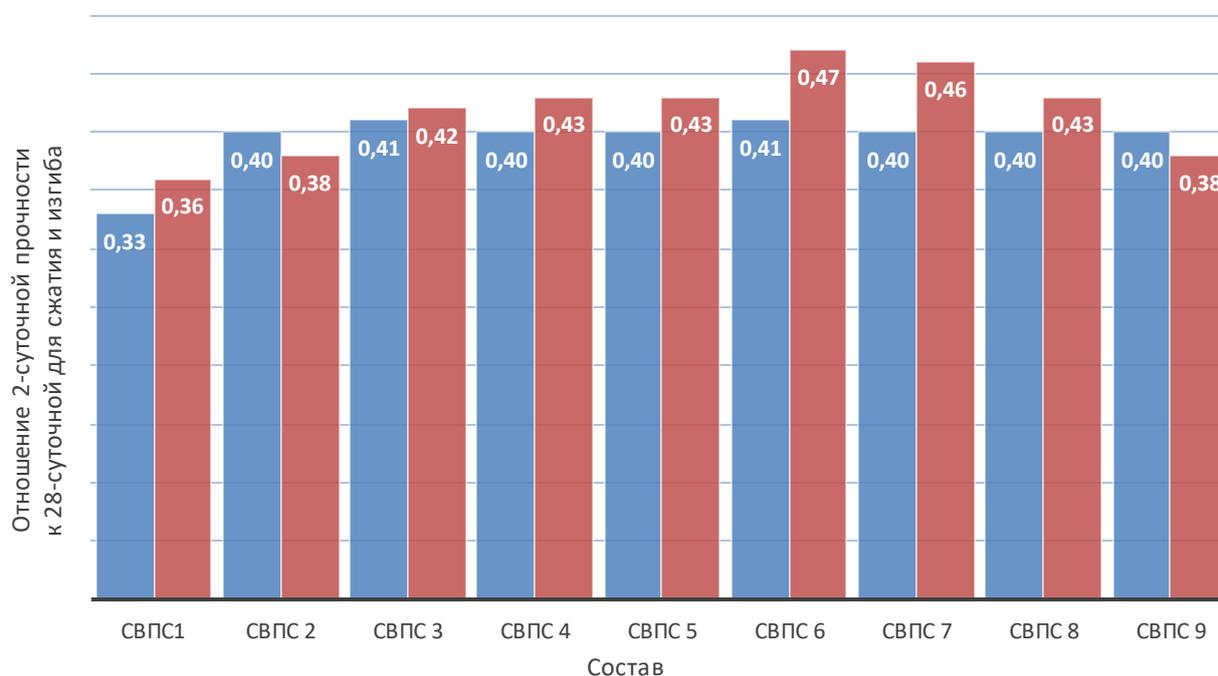


Рис. 6. Отношение 2-суточной прочности к 28-суточной для сжатия и изгиба

Fig. 6. Ratio of 2-day to 28-day strength for compression and bending

Кроме того, отношение значений прочностных свойств во вторые сутки к аналогичным показателям в 28-е также высоко (рис. 6). 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 со-

хранение 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% (см. рис. 4). При этом прочность на растяжение при изгибе превышает до 50% значения для контрольного состава (см. рис. 5).

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 (рис. 7). Это происходит несмотря на замещение портландцементного клинкера более 50 мас. % отходами ММС железистых кварцитов, ТВМ и СП. Высокое значение этого отношения указывает на развитие трещиностойкости материала. Для рационально разработанного состава (СВПС6) 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 28-е – 0,12. Все эти значения не ниже, а зачастую превосходят значения контрольных составов.

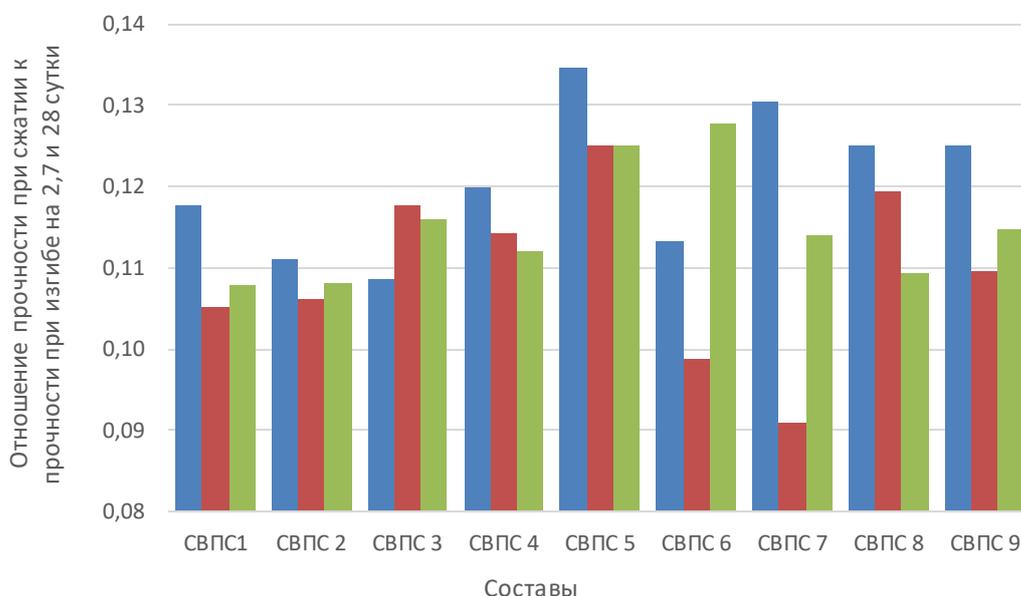


Рис. 7. Отношение прочности при сжатии и прочности при изгибе на 2,7-е и 28-е сутки

Fig. 7. Ratio of compressive strength to flexural strength at 2, 7 and 28 days

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. Полимнеральные компоненты, такие как отходы ММС железистых кварцитов и ТВМ, активно участвуют в гидратационных реакциях и пуццолановой реакции с гидроксидом кальция. 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, то есть 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, которые могут быть разлиты по дорожному покрытию. Это повышает устойчивость материала к коррозии и деградации.

3. Улучшенная механическая прочность: уплотнение микроструктуры материала также способствует 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 КВ-50 (ММС), во всех случаях превышают характеристики образцов аналогичного состава, изготовленных на других вяжущих, и таким образом позволяют существенно снизить расход клинкерной составляющей.

Все разработанные инъекционные растворы показывают марку по морозостойкости F2100.

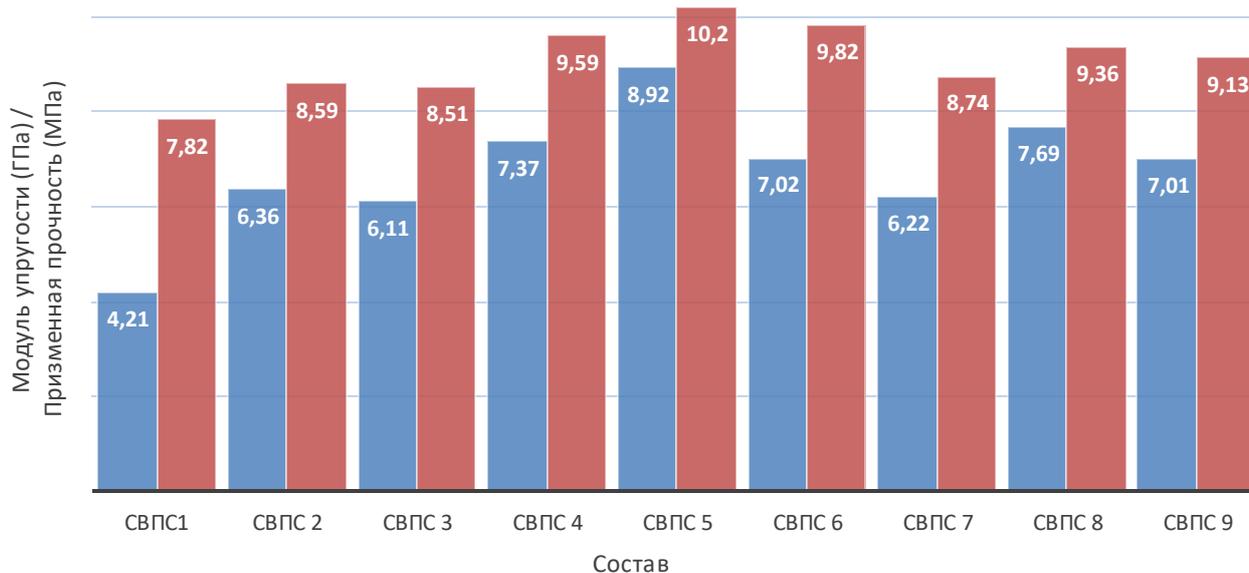
Разработанные высокопроницающие растворы соответствуют требованиям ГОСТ 59538-2021 (табл. 2).

Таблица / Table 2

**Соответствие разработанных высокопроницающих растворов ГОСТ 59538-2021**  
Compliance of the developed highly penetrating solutions with GOST 59538-2021

Характеристика	СВПС	ГОСТ 59538-2021
Удельная поверхность цемента, м <sup>2</sup> /кг	450	300–500
Класс прочности на сжатие	B5–B10	B5–B20
Марка по удобоукладываемости	П4 (осадка конуса больше 30 см)	П1–П4
Водоотделение	≤8%	2–8%, время полного водоотделения более 30 мин (стабильные)
	≤16%	8–16%, время полного водоотделения 20–30 мин (условно-стабильные)
Марка по водонепроницаемости	W6–W16	W4–W12
Марка по морозостойкости	F <sub>2</sub> 100	F15–200

В связи с высокой интенсивностью движения на дорожном полотне большое значение имеет изучение деформативных характеристик. Одним из основных показателей 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 (рис. 8).



**Рис. 8. Деформативные свойства смесей высокой проникающей способности**

Fig. 8. Deformative properties of mixtures of high penetrating ability

Установлено увеличение деформативных характеристик затвердевшей на КВ-50СП+1%ТВМ по сравнению со смесью на цементе ЦЕМ I 42.5 Н на 112%. Исследования деформативных свойств смесей позволяют сделать вывод о том, что на основе разработанных СВПС и щебня из метаморфических сланцев возможно получение бетонов для дорожных оснований, соответствующих нормативной документации для данного вида строительства [11,14, 27].

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 КВ-50 на основе отходов ММС выше, чем у бетона контрольного состава на обычном портландцементе, что можно объяснить высокими характеристиками самого композиционного вяжущего (высокой дисперсностью, низкой водопотребностью, высокой активностью), из-за 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 позволяет 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.

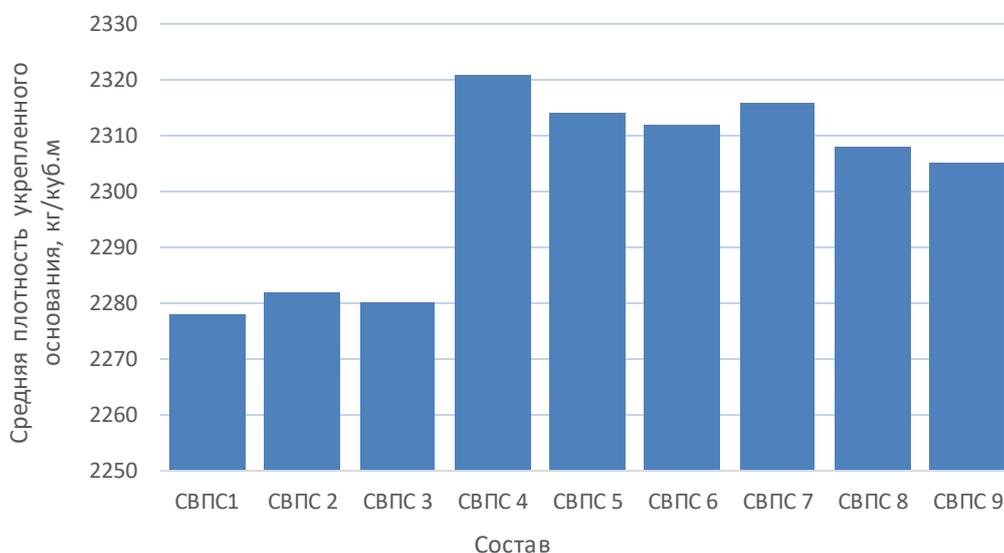
### 3.2. Укрепление оснований дорожных одежд разработанными смесями

На основе подобранных составов смесей с высокой проникающей способностью были проведены опыты по укреплению слоя щебеночного основания. Образцы формовались методом заливки щебеночного каркаса в формах 15x15x15 см, состоящего из сланцевого щебня фракции 40–70 мм (табл. 3). Ориентировочный расход СВПС на 1 м<sup>2</sup> основания составляет 100 кг.

**Характеристики сланцевого щебня закрепляемого основания**  
 Characteristics of shale crushed stone for a fixed base

Наименование показателей	Значение
Полные остатки на сите по массе, % <b>d</b>	97,9
То же <b>0,5(d+D)</b>	67,3
То же <b>D</b>	6,8
То же <b>1,25 D</b>	0
Содержание зерен пластинчатой и игольчатой формы, %	45,2
Содержание глинистых и пылевидных частиц, %	0,5
Содержание глины в виде комков, %	0
Содержание зерен слабых пород, %	0
Марка щебня по прочности	800
Морозостойкость циклов	200
Насыпная плотность	1,3
Класс щебня по содержанию радионуклидов	Первый

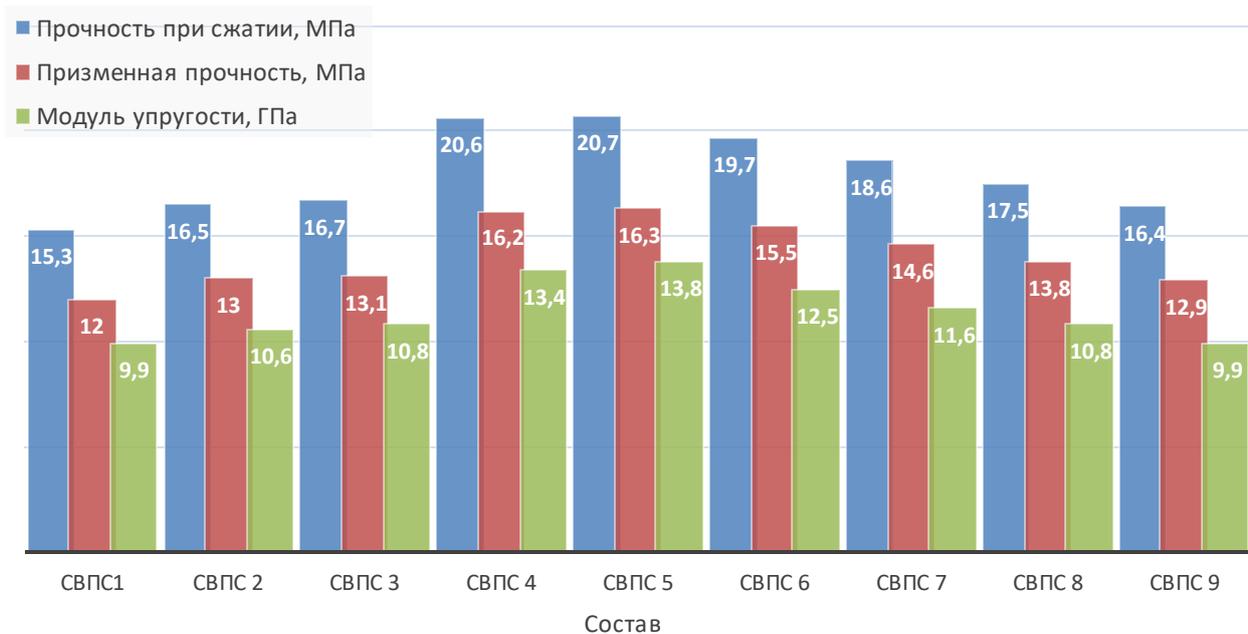
Средняя плотность укрепленного основания показывает минимальные значения на уровне 2278 кг/м<sup>3</sup> для контрольного состава с уплотнением материала при введении суперпластификатора, отходов ММС и минерального модификатора (рис. 9). При этом максимальное повышение средней плотности отмечается для составов с использованием всех этих компонентов (отходы ММС – 50 мас. %, минеральный модификатор – 1,5 мас. %, суперпластификатор – 0,6 мас. %).



**Рис. 9. Средняя плотность укрепленных оснований**

Fig. 9. Average density of reinforced bases

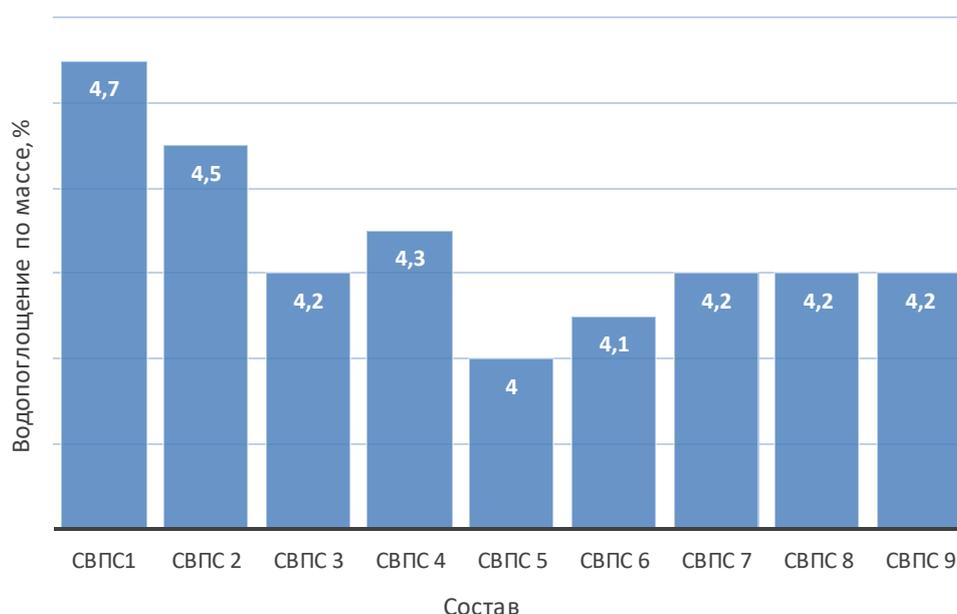
Аналогичная тенденция прослеживается и для всего комплекса физико-механических свойств укрепленного основания. Прочность при сжатии, призмная прочность и модуль упругости укрепленного основания показывают минимальные значения на уровне 15,3 МПа, 12,0 МПа и 9,9 ГПа, соответственно для контрольного состава с ростом этих значений при введении суперпластификатора, отходов ММС и минерального модификатора (см. рис. 4, рис. 10). При этом максимальное повышение всех физико-механических свойств отмечается для составов с использованием всех этих компонентов (отходы ММС – 50 мас. %, минеральный модификатор – 1,5 мас. %, суперпластификатор – 0,6 мас. %).



**Рис. 10. Физико-механические свойства укрепленных оснований**

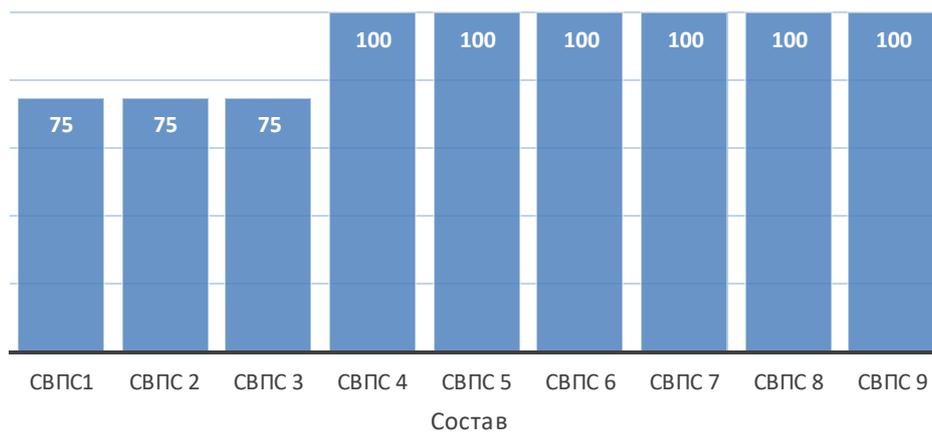
Fig. 10. Physico-mechanical properties of reinforced bases

Эти результаты подтверждаются исследованием водопоглощения по массе, где максимальное значение отмечается для контрольного бездобавочного состава (4,7 мас. %) с закономерным снижением при введении рационального содержания как суперпластификатора, так и минерального модификатора (рис. 11). Самое низкое водопоглощение отмечено для состава на композиционном вяжущем КВ-50СП (4,0 мас. %) и КВ-50СП+1%ТВМ (4,1 мас. %). Немного более высокие показатели отмечены у всех составов с 60%-ным замещением портландцемента отходами ММС (4,2 мас. %); равенство значений объясняется разбавлением вяжущего, нивелирующего эффективность других малых добавок (суперпластификатор и техногенный волокнистый материал). Низкое водопоглощение означает, что материал имеет малое значение открытой капиллярной пористости. Как результат, низкое водопоглощение приводит к росту морозостойкости (рис. 12).



**Рис. 11. Водопоглощение по массе укрепленных оснований**

Fig. 11. Water absorption by mass of reinforced bases



**Рис. 12. Морозостойкость укрепленных оснований F<sub>1</sub>**

**Fig. 12. Frost resistance of reinforced bases F<sub>1</sub>**

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

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 [12–13, 26].

Снижение материалоемкости и себестоимости строительства автомобильных дорог возможно за счет применения местных сырьевых ресурсов и, в первую очередь, техногенного сырья.

Это предопределяет необходимость широкого использования для строительства как оснований, так и покрытий автомобильных дорог – бетонов с использованием местного сырья и отходов промышленности.

Таким образом, применение смесей с высокой проникающей способностью на основе композиционных вяжущих и техногенных песков для устройства укрепленных оснований позволит не только исключить дорогостоящий щебень, вследствие чего снизится материалоемкость дорожных одежд, но и в значительной степени улучшить экологическую обстановку благодаря утилизации отходов, сотни миллионов тонн которых скопились в отвалах и хвостохранилищах горнодобывающих и горно-обогатительных комбинатов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Amran M., Fediuk R., Abdelgader H.S., Murali G., Ozbakkaloglu T., Lee Y.H., Lee Y.Y. Fiber-reinforced alkali-activated concrete: a review // *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 45. Art. 103638.
2. Aziez M.N., Achour A., Bahaz A., Lakhdari Z. Effect of waste brick powder rich in SiO<sub>2</sub> on the physical and mechanical properties of Portland cement concrete containing coarse recycled asphalt pavement aggregates (RAP) // *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 76. Art. 107337. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107337>
3. Chiranjeevi K., Kumar D.H., Yathish R.G., Ravi Shankar A.U. Laboratory investigation on cement-treated recycled concrete aggregate bases for flexible pavements // *Materials Today: Proceedings*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.509>
4. Dilip D.M., Sivakumar Babu G.L. System reliability-based design optimization of flexible pavements using adaptive meta-modelling techniques // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 367. Art. 130351. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130351>

5. Fang M., Chen Y., Zhu M. Toughness improvement mechanism and evaluation of cement concrete for road pavement: A review // *Journal of Road Engineering*. 2023. Vol. 3(2). P. 125–140. <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2023.01.005>
6. Fediuk R., Mochalov A., Timokhin R. Review of methods for activation of binder and concrete mixes // *AIMS Materials Science*. 2018. Vol. 5(5). P. 916–931.
7. Feng S., Gao M., Jin X., Zhao T., Yang F. Fine-grained damage detection of cement concrete pavement based on UAV remote sensing image segmentation and stitching // *Measurement*. 2024. Vol. 226. Art. 113844. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113844>
8. Karthikeyan K., Kothandaraman S., Sarang G. Perspectives on the utilization of Reclaimed Asphalt Pavement in concrete pavement construction: A critical review // *Case Studies in Construction Materials*. 2023. Art. e02242. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02242>
9. Li C., Lei S., Xiao Q., Pan Y., Han X., Chen Q. An experimental and numerical investigation on the load transfer efficiency of a novel prefabricated cement concrete pavement // *Structures*. 2023. Vol. 53. P. 963–972. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.04.130>
10. Li Y., Li L., Liu Z. Preparation and evaluation of a fluorinated nano-silica super-hydrophobic coating for cement pavement // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 360. Art. 129478. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129478>
11. Махортов Д.С., Загороднюк Л.Х., Сумской Д.А. Вяжущие композиции на основе поргланце-мента и вулканического пепла // *Строительные материалы и изделия*. 2022. Т. 5, № 4. С. 30–38. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-4-30-38>
12. Murali G., Fediuk R. A Taguchi approach for study on impact response of ultra-high-performance polypropylene fibrous cementitious composite // *Journal of Building Engineering*. 2020. Vol. 30. Art. 101301.
13. Панарин И.И., Федюк Р.С., Выходцев И.А., Вавренюк С.В., Клюев А.В. Инъекционные растворы на композиционных цементах для закрепления грунтов // *Строительные материалы и изделия*. 2023. Т. 6, № 4. С. 15–29. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-4-15-29>
14. Patil R.R., Katare V.D. Application of fiber reinforced cement composites in rigid pavements: A review // *Materials Today: Proceedings*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.415>
15. Pham P.N., Tran T.T.T., Zhuge Y. Rubberized cement-stabilized aggregates: Mechanical performance, thermal properties, and effect on temperature fluctuation in road pavements // *Transportation Geotechnics*. 2023. Vol. 40. Art. 100982. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.100982>
16. Sinitsin D.A., Elrefaei A.E.M.M., Glazachev A.O., Kuznetsov D.V., Parfenova A.A., Volokitina I.E., Kayumova E.I., Nedoseko I.V. Study of the characteristics of pavement elements made of reinforced soil with the use of secondary resources // *Construction Materials and Products*. 2023. Vol. 6, № 6. Art. 2. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-6-2>
17. Sun B., Xu T., Zhang H., Li Y., Huang X., Qi L., Zhao L. Analysis of alkali leaching mechanism on as-built cement concrete bridge deck pavement: View from the perspective of mesostructure characteristics // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 409. Art. 134054. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134054>
18. Wang C., Chazallon C., Jing P., Hornych P., Latour B. Effect of self-cementing properties on the mechanical behaviour of recycled concrete aggregates in unbound pavement layers // *Transportation Geotechnics*, 2023. Vol. 42. Art. 101054. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101054>
19. Wang C., Chazallon C., Braymand S., Hornych P. Thermogravimetric analysis (TGA) for characterization of self-cementation of recycled concrete aggregates in pavement // *Thermochimica Acta*. 2024. Vol. 733. Art. 179680. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2024.179680>
20. Wang H., Wu Y., Guo Y. In-site health monitoring of cement concrete pavements based on optical fiber sensing technology // *Journal of Road Engineering*. 2023. Vol. 3, Issue 1. P. 113–123. <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2022.09.003>
21. Yao Y., Li S., Jiang Y. Experimental-mechanistic analysis of pavement base deflections measured with light weight deflectometer // *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2023. Vol. 10, Issue 2. P. 320–330. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.08.006>
22. Zhao H., Yang F., Qian X., Tian Y., Yang H., Li M., Fang Y., Wang J., Ling J. A bio-inspired mineral precipitation method to improve the freeze-thaw resistance of cement concrete pavement // *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 419. Art. 138277. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138277>
23. Zhao J., Wang X., Zhou B., Wu W., Zheng W., Yuan C. Influence of surface characteristics of cement pavement on ice-concrete adhesion // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 394. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132259>

24. Zhao W., Yang Q., Liu J., Wu W. Influence analysis of the selection of foundation model on fatigue stress evaluation results of cement concrete pavement-based on GPR and FWD // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 347. Art. 128586. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128586>
25. Zhao W., Zhang J., Lai J., Shi X., Xu Z. Skid resistance of cement concrete pavement in highway tunnel: A review // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 406. Art. 133235. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133235>
26. Zhao W., Yang Q., Wu W., Liu J. Structural condition assessment and fatigue stress analysis of cement concrete pavement based on the GPR and FWD // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 328. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127044>
27. Zheng Z., Guo N., Sun Y., Wang J., You Z. A novel approach for the mechanical response of cement concrete pavement structure considering the interlaminar interface shear slip effect // *Structures*. 2023. Vol. 57. Art. 105066. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105066>
28. Zhong J., Huyan J., Huang B. A deeper generative adversarial network for grooved cement concrete pavement crack detection // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2023. Vol. 119. Art. 105808. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105808>

## REFERENCES

1. Amran M., Fediuk R., Abdelgader H.S., Murali G., Ozbakkaloglu T., Lee Y.H., Lee Y.Y. Fiber-reinforced alkali-activated concrete: a review. *Journal of Building Engineering*. 2022, vol. 45, art. 103638.
2. Aziez M.N., Achour A., Bahaz A., Lakhdari Z. Effect of waste brick powder rich in SiO<sub>2</sub> on the physical and mechanical properties of Portland cement concrete containing coarse recycled asphalt pavement aggregates (RAP). *Journal of Building Engineering*. 2023, vol. 76, art. 107337. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2023.107337>
3. Chiranjeevi K., Kumar D.H., Yathish R.G., Ravi Shankar A.U. Laboratory investigation on cement-treated recycled concrete aggregate bases for flexible pavements. *Materials Today: Proceedings*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.509>
4. Dilip D.M., Sivakumar Babu G.L. System reliability-based design optimization of flexible pavements using adaptive meta-modelling techniques. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 367. Art. 130351. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130351>
5. Fang M., Chen Y., Zhu M. Toughness improvement mechanism and evaluation of cement concrete for road pavement: A review. *Journal of Road Engineering*. 2023, vol. 3(2), pp. 125–140. <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2023.01.005>
6. Fediuk R., Mochalov A., Timokhin R. Review of methods for activation of binder and concrete mixes. *AIMS Materials Science*. 2018, vol. 5(5). P. 916–931.
7. Feng S., Gao M., Jin X., Zhao T., Yang F. Fine-grained damage detection of cement concrete pavement based on UAV remote sensing image segmentation and stitching. *Measurement*. 2024, vol. 226, art. 113844. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113844>
8. Karthikeyan K., Kothandaraman S., Sarang G. Perspectives on the utilization of Reclaimed Asphalt Pavement in concrete pavement construction: A critical review. *Case Studies in Construction Materials*. 2023, art. 02242. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02242>
9. Li C., Lei S., Xiao Q., Pan Y., Han X., Chen Q. An experimental and numerical investigation on the load transfer efficiency of a novel prefabricated cement concrete pavement. *Structures*. 2023, vol. 53, pp. 963–972. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.04.130>
10. Li Y., Li L., Liu Z. Preparation and evaluation of a fluorinated nano-silica super-hydrophobic coating for cement pavement. *Construction and Building Materials*. 2022, vol. 360, art. 129478. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129478>
11. Makhortov D.S., Zagorodnyuk L.H., Sumskey D.A. Binder compositions based on Portland cement and volcanic ash. *Construction Materials and Products*. 2022, vol. 5, no. 4, pp. 30–38. (In Russ.). <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-4-30-38>
12. Murali G., Fediuk R. A Taguchi approach for study on impact response of ultra-high-performance polypropylene fibrous cementitious composite. *Journal of Building Engineering*. 2020, vol. 30, art. 101301.
13. Panarin I.I., Fediuk R.S., Vykhodtsev I.A., Vavrenyuk S.V., Klyuev A.V. Injection mortars based on composite cements for soil fixation. *Construction Materials and Products*. 2023, vol. 6, no. 4, pp. 15–29. (In Russ.). <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-4-15-29>

14. Patil R.R., Katare V.D. Application of fiber reinforced cement composites in rigid pavements: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.415>
15. Pham P.N., Tran T.T.T., Zhuge Y. Rubberized cement-stabilized aggregates: Mechanical performance, thermal properties, and effect on temperature fluctuation in road pavements. *Transportation Geotechnics*. 2023, vol. 40, art. 100982. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.100982>
16. Sinitsin D.A., Elrefaei A.E.M.M., Glazachev A.O., Kuznetsov D.V., Parfenova A.A., Volokitina I.E., Kayumova E.I., Nedoseko I.V. Study of the characteristics of pavement elements made of reinforced soil with the use of secondary resources. *Construction Materials and Products*. 2023. vol. 6, no. 6, art. 2. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-6-2>
17. Sun B., Xu T., Zhang H., Li Y., Huang X., Qi L., Zhao L. Analysis of alkali leaching mechanism on as-built cement concrete bridge deck pavement: View from the perspective of mesostructure characteristics. *Construction and Building Materials*. 2023, vol. 409, art. 134054. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134054>
18. Wang C., Chazallon C., Jing P., Hornych P., Latour B. Effect of self-cementing properties on the mechanical behaviour of recycled concrete aggregates in unbound pavement layers. *Transportation Geotechnics*, 2023, vol. 42, art. 101054. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101054>
19. Wang C., Chazallon C., Braymand S., Hornych P. Thermogravimetric analysis (TGA) for characterization of self-cementation of recycled concrete aggregates in pavement. *Thermochimica Acta*. 2024, vol. 733, art. 179680. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2024.179680>
20. Wang H., Wu Y., Guo Y. In-site health monitoring of cement concrete pavements based on optical fiber sensing technology. *Journal of Road Engineering*. 2023, vol. 3, Issue 1. P. 113–123. <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2022.09.003>
21. Yao Y., Li S., Jiang Y. Experimental-mechanistic analysis of pavement base deflections measured with light weight deflectometer. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2023, vol. 10, iss. 2, pp. 320–330. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.08.006>
22. Zhao H., Yang F., Qian X., Tian Y., Yang H., Li M., Fang Y., Wang J., Ling J. A bio-inspired mineral precipitation method to improve the freeze-thaw resistance of cement concrete pavement. *Journal of Cleaner Production*. 2023, vol. 419, art. 138277. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138277>
23. Zhao J., Wang X., Zhou B., Wu W., Zheng W., Yuan C. Influence of surface characteristics of cement pavement on ice-concrete adhesion. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 394. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132259>
24. Zhao W., Yang Q., Liu J., Wu W. Influence analysis of the selection of foundation model on fatigue stress evaluation results of cement concrete pavement-based on GPR and FWD. *Construction and Building Materials*. 2022, vol. 347, art. 128586. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128586>
25. Zhao W., Zhang J., Lai J., Shi X., Xu Z. Skid resistance of cement concrete pavement in highway tunnel: A review. *Construction and Building Materials*. 2023, vol. 406, art. 133235. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133235>
26. Zhao W., Yang Q., Wu W., Liu J. Structural condition assessment and fatigue stress analysis of cement concrete pavement based on the GPR and FWD. *Construction and Building Materials*. 2022, vol. 328. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127044>
27. Zheng Z., Guo N., Sun Y., Wang J., You Z. A novel approach for the mechanical response of cement concrete pavement structure considering the interlaminar interface shear slip effect. *Structures*. 2023, vol. 57, art. 105066. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105066>
28. Zhong J., Huyan J., Huang B. A deeper generative adversarial network for grooved cement concrete pavement crack detection. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2023, vol. 119, art. 105808. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105808>

### Информация об авторах

**Клюев Сергей Васильевич** – доктор технических наук, доцент, заведующий Научно-исследовательской лаборатории ресурсо-энергосберегающих технологий, оборудования и комплексов Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (Белгород, Россия), [klyuyev@yandex.ru](mailto:klyuyev@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1995-6139>

**Золотарева Светлана Васильевна** – аспирант Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (Белгород, Россия), [svet.zolotarewa2012@yandex.ru](mailto:svet.zolotarewa2012@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7540-8164>

**Аюбов Нарман Аюбович** – кандидат экономических наук, доцент, научный сотрудник Комплексного научно-исследовательского института им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук (г. Грозный, Россия), yrekly@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8129-9598>

**Федюк Роман Сергеевич** – доктор технических наук, доцент, профессор военного учебного центра при Дальневосточном федеральном университете (Владивосток, Россия), roman44@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2279-1240>

**Лисейцев Юрий Леонидович** – соискатель Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема (Биробиджан, Россия), y.liss@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2279-1240>

### Information about the authors

**Sergey V. Klyuyev**, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Research Laboratory of Resource-Energy Saving Technologies, Equipment and Complexes of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shoukhov (Belgorod, Russia), klyuyev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1995-6139>

**Svetlana V. Zolotareva**, Graduate Student of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shoukhov (Belgorod, Russia), svet.zolotarewa2012@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7540-8164>

**Narman A. Ayubov**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Researcher at Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences (Grozny, Russia), yrekly@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8129-9598>

**Roman S. Fedyuk**, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of the Military Training Center at the Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russia), roman44@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2279-1240>

**Yury L. Liseytshev**, Applicant of the Sholom-Aleichem Priamursky State University (Birobidzhan, Russia), y.liss@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4515-6880>

### Вклад авторов

С.В. Ключев – разработка концепции и дизайна исследования; С.В. Золотарева, Н.А. Аюбов – сбор данных; Р.С. Федюк, Ю.Л. Лисейцев – анализ и интерпретация результатов; подготовка и редактирование текста. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Contribution of the authors

The authors confirm contribution to the paper as follows: S.V. Klyuyev – development of research concept and design; S.V. Zolotareva, N.A. Ayubov – data collection; R.S. Fedyuk, Yu.L. Liseytshev – analysis and interpretation of results; text preparation and editing. All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Информация о статье

Статья поступила в редакцию 04.02.2024; одобрена после рецензирования 11.03.2024; принята к публикации 15.03.2024.

### Information about the article

The article was submitted: February 4, 2024; approved after reviewing: March 11, 2024; accepted for publication March 15, 2024.