

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УКРЕПЛЕННЫХ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТОМ ЩЕБЕНОЧНО-ПЕСЧАНЫХ СМЕСЕЙ

Евгений Алексеевич Лукаш¹, Георгий Романович Сушков²

^{1,2} Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, Белгород, Россия,

¹svh8@yandex.ru, ²zhora.sushkov@mail.ru

Аннотация. В статье исследовано улучшение физико-механических характеристик укрепленных портландцементом щебеночно-песчаных смесей за счет использования добавок «Powerflow 3195» и «Muraplast FK 88». Показано, что физико-механические характеристики модифицированных укрепленных смесей существенно повышаются. При использовании добавки «Powerflow 3195» возрастают предел прочности на сжатие до 54 % и предел прочности на растяжение при изгибе до 80 %. Это свидетельствует об уменьшении усадочных трещин. Максимальный показатель прочности достигнут у образцов с добавкой «Muraplast FK 88» (до 67 %). Применение этого модификатора позволяет повысить прочность укрепляемого материала до марки М100 при 4 % процентном содержании цемента. Смесей, укрепленные 3 % цемента с содержанием стабилизирующих добавок, показали аналогичные результаты увеличения прочностных показателей. На основании изученных характеристик определены рациональные составы.

Ключевые слова: щебеночно-песчаная смесь, цемент, добавка, набор прочности, дорожная одежда

Для цитирования: Лукаш Е. А., Сушков Г. Р. Исследование влияния стабилизирующих добавок на физико-механические характеристики укрепленных портландцементом щебеночно-песчаных смесей // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. 2025. Выпуск 2025-3(173) Здания и сооружения с применением новых материалов и технологий. С. 87–94. doi: 10.71536/vd.2025.3c173.9. edn: iyjkwtr.

Original article

STUDY OF THE EFFECT OF STABILIZING ADDITIVES ON PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF PORTLAND CEMENT-REINFORCED CRUSHED STONE-SAND MIXTURES

Evgeny A. Lukash¹, Georgy R. Sushkov²

^{1,2} Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russia,

¹svh8@yandex.ru, ²zhora.sushkov@mail.ru

Abstract. The article studies the improvement of physical and mechanical properties of crushed stone-sand mixtures reinforced with Portland cement due to the use of additives «Powerflow 3195» and «Muraplast FK 88». It is shown that physical and mechanical properties of modified reinforced mixtures increase significantly. When using the additive «Powerflow 3195» the compressive strength limit increases up to 54 % and the tensile strength limit in bending up to 80 %. This indicates a decrease in shrinkage cracks. The maximum strength indicator is achieved in samples with the additive «Muraplast FK 88» (up to 67 %). The use of this modifier allows to increase the strength of the reinforced material up to the M100 grade with a 4 % cement content. Mixtures reinforced with 3 % cement containing stabilizing additives showed similar results of increasing strength indicators. Rational compositions are determined based on the studied characteristics.

Keywords: crushed stone-sand mixture, cement, additive, strength gain, road surface



For citation: Lukash E. A., Sushkov G. R. Study of the effect of stabilizing additives on physical and mechanical characteristics of portland cement-reinforced crushed stone-sand mixtures. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Buildings and structures using new materials and technologies*. 2025;3(173):87–94. (In Russ.). doi: 10.71536/vd.2025.3c173.9. edn: iyjkw.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России растут темпы дорожного строительства. В этой связи научно-практический интерес представляют технологии, в которых используются высокоэффективные технические приемы, позволяющие создавать эффективные материалы для устройства дорожных одежд из местных укрепленных грунтов и обработанных материалов. Это позволит решить не только приоритетные задачи по повышению транспортной доступности, но также улучшению экологической ситуации и социально-экономическому развитию регионов [1].

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Возможным вариантом увеличения общего модуля упругости на поверхности конструкции дорожной одежды и снижения накопления остаточных деформаций является устройство слоев оснований из укрепленных различными вяжущими щебеночно-песчаных смесей [2].

Под укреплением следует понимать совокупность мероприятий по обработке неорганическими вяжущими щебеночно-гравийно-песчаных смесей с целью повышения их физико-механических свойств [3]. Значительные достижения в укреплении грунтов получены при работе с минеральными вяжущими [4–7]. Применение минеральных вяжущих в чистом виде характеризуется рядом существенных недостатков, которые ограничивают их эффективность в укреплении грунтов. Одним из наиболее значимых аспектов является низкая трещиностойкость укрепленных материалов при достижении прочностных характеристик выше 40 МПа. Этот недостаток обусловлен низкой деформативностью вяжущих, что приводит к их неспособности адаптироваться к изменениям объема грунта под воздействием внешних нагрузок. Кроме того, низкая водостойкость минеральных вяжущих требует значительного увеличения их дозировки для достижения требуемых эксплуатационных свойств. Это, в свою очередь, существенно повышает общую стоимость строительных проектов. В некоторых случаях, особенно при работе с грунтами, обладающими специфическими характеристиками, обеспечение требуемых показателей морозостойкости становится особенно сложной задачей [8].

Важной особенностью при строительстве слоев из щебеночно-песчаных смесей, обработанных цементом (ЩПЦС), является необходимость устройства технологического перерыва для необходимого набора марочной прочности уложенного конструктивного слоя. В свою очередь, это увеличивает сроки и стоимость строительства автомобильной дороги.

Усадка ЩПЦС обусловлена сложными физико-химическими процессами, происходящими при гидратации и кристаллизации цементного вяжущего. В процессе гидратации цемента вода взаимодействует с минеральными компонентами, образуя гидратные фазы, обладающие меньшим объемом по сравнению с исходными компонентами. В результате этих процессов возникают усадочные трещины, которые являются важным аспектом, влияющим на эксплуатационные характеристики строительных материалов. По мере завершения гидратации и формирования кристаллических структур, интенсивность усадки ЩПЦС снижается, что свидетельствует о достижении равновесного состояния материала [2].

Для минимизации начальных усадочных трещин в ЩПЦС применяются различные технологические методы. Эти методы включают оптимизацию состава смеси, увлажнение среды при тепловой обработке, увлажнение поверхности, а также введение специальных добавок. Оптимизация состава смеси осуществляется путем подбора оптимальных пропорций цемента, песка и воды, что позволяет снизить внутренние напряжения в материале. Увлажнение среды при тепловой обработке способствует равномерному распределению тепла и минимизации термических деформаций, что, в свою очередь, уменьшает вероятность возникновения трещин. Увлажнение поверхности предотвращает быстрое испарение влаги, что снижает градиенты влажности и, соответственно, усадочные напряжения.

Введение добавок, таких как пластификаторы, воздухововлекающие агенты и гидрофобизаторы, существенно улучшает реологические свойства смеси, повышает её пластичность и уменьшает усадку. Эти

добавки позволяют более эффективно управлять технологическими параметрами процесса твердения бетона, что способствует снижению количества и размеров усадочных трещин.

Таким образом, комплексный подход, включающий вышеупомянутые технологические методы, позволяет значительно уменьшить начальные усадочные трещины в цементно-песчаных смесях, что повышает качество и долговечность бетонных конструкций [9–11].

ЦЕЛЬ СТАТЬИ

Цель данной статьи заключается в проведении исследований влияния на физико-механические характеристики ЦПС двух стабилизирующих добавок «Powerflow 3195» и «Muraplast FK 88». Эти материалы представляют собой полимеры, которые позволяют изменять технические характеристики грунтов с переменным размером частиц, минеральным и химическим составом.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ ИССЛЕДОВАНИЯ

Характеристики добавок приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики стабилизирующих добавок

Описание	Наименование добавки	
	Powerflow 3195	Muraplast FK 88
Особенности применения	<ul style="list-style-type: none"> • Высокоуниверсален при работе со сложными сырьевыми материалами, с приданием дополнительных характеристик по отношению к действию добавки в области суперпластификации-суперводоредукцией. • Повышение пластичности и однородности смесей, продукт демонстрирует высокую эффективность при небольшом расходе цемента. • Оказывает положительное воздействие на уменьшение интенсивности выделения тепла, что снижает риск возникновения термических повреждений. • Высокая динамика набора прочности. 	<ul style="list-style-type: none"> • Продукт, полученный путём конденсации с использованием поверхностно-активных веществ. • Ярко выраженный эффект диспергирования и пластификации. • Снижение расслоения и водоотделения. • Уменьшение осаждения крупного заполнителя. • Увеличение диапазона изменения уровня воды. • Существенное улучшение удобоукладываемости. • Снижение интенсивности тепловыделения цемента. • Позволяет повысить марку по водонепроницаемости.
Внешний вид	Жидкость коричневого цвета	
Плотность, г/см ³	1,05–1,08	1,15–1,18
Дозировка, % от массы цемента	0,05–5,0	0,2–2,0
Транспортирование и хранение	В оригинальной упаковке при температуре окружающего воздуха не ниже 0 °С и не выше +40 °С	

Эти добавки обеспечивают формирование стабильных связей в процессе кристаллизации и коагуляции. Их рекомендуется использовать вместе с минеральным вяжущим материалом. Такое применение добавок позволяет улучшить физико-механические свойства материала, уменьшить расход вяжущего, ускорить набор прочности и снизить вероятность появления усадочных трещин. Модификаторы демонстрируют высокую степень адаптации к специфическим условиям эксплуатации, что позволяет оптимизировать процессы твердения и повысить долговечность строительных материалов.

Гидратационное твердение минеральных вяжущих представляет собой сложный физико-химический процесс, который протекает по кристаллизационному механизму. Данный механизм представляет собой процесс растворения вяжущих веществ, сопровождающийся образованием термодинамически стабильных гидратных растворов. В результате последовательности химических реакций, происходящих в этих растворах, формируются гидратные новообразованные фазы, которые инициируют образование коагуляционных структур, а затем и более прочных межмолекулярных и фазовых контактов. Эти структурные преобразования приводят к постепенному нарастанию прочностных характеристик и гидратационному твердению вяжущих материалов. Согласно твердофазово-топохимической схеме гидратационного твердения, ключевым этапом является инфильтрация молекул воды в кристаллическую решетку вяжущего

вещества, что вызывает инициирование последующих химических реакций и структурных изменений. Это приводит к их непосредственному взаимодействию с решеткой, что вызывает химическую реакцию и образование новых кристаллических фаз. Таким образом, гидратация представляет собой сложный многостадийный процесс, включающий растворение, диффузию, химическую реакцию и кристаллизацию, который в конечном итоге обеспечивает формирование прочных и долговечных строительных материалов. Этот процесс сопровождается фазовыми превращениями и структурными изменениями, что приводит к формированию прочных и долговечных гидратных структур [12].

Ускоряющий эффект добавок, содержащих ионы, аналогичные ионам вяжущего, на процесс гидратационного твердения обусловлен их способностью значительно повышать вероятность формирования зародышей новой фазы. В контексте силикатных фаз цемента, добавки, включающие одноименные ионы, такие как хлорид, нитрат и нитрит кальция, выступают в роли ускорителей твердения по двум ключевым механизмам. Во-первых, клинкерные минералы, кинетика гидратации которых существенно зависит от стадии растворения, демонстрируют высокую чувствительность к ускорению процесса зарождения новой фазы. Во-вторых, при введении данных добавок в избыточных количествах происходит их взаимодействие с гидроксидом кальция, что приводит к образованию соответствующих двойных солей. Этот процесс, в свою очередь, способствует увеличению растворимости клинкерных минералов, тем самым ускоряя динамику гидратационного твердения [13].

В работе использовался нормальнотвердеющий портландцемент марки ЦЕМ I 42,5 Н производства АО «ЦЕМРОС». В рамках исследования были разработаны и оптимизированы рецептуры щебеночно-песчаных композиций, которые представлены в таблице 2.

Таблица 2. Составы щебеночно-песчано-цементных смесей

№ п/п	Состав смесей, %				Содержание добавок от цемента, %	
	Щебень	Песок	Цемент	Вода	Powerflow 3195	Muraplast FK 88
1	60	36	4	3,5	–	–
2	60	36	4	3,5	1,6	–
3	60	36	4	3,5	–	1,5
4	60	37	3	2,5	–	–
5	60	37	3	2,5	1,6	–
6	60	37	3	2,5	–	1,5

Для проведения исследований были подготовлены цилиндрические образцы диаметром 100 мм и высотой 120 мм из исследуемых смесей. Процесс изготовления образцов осуществлялся в соответствии с методическими рекомендациями, изложенными в [14]. После завершения процесса формования образцы извлекались и подвергались хранению в условиях естественного температурно-влажностного режима до начала проведения испытаний. Результаты испытаний представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты испытаний образцов из ШПЦС с добавками

Наименование смеси	Прочность, МПа, в зависимости от времени твердения образцов					
	на сжатие $R_{сж}$			на растяжение при раскалывании $R_{раст}$		
	3 суток	7 суток	28 суток	3 суток	7 суток	28 суток
1. ШПЦС + 4 % цемента	3,69	4,34	6,32	0,46	0,81	1,22
2. ШПЦС + 4 % цемента + Powerflow 3195	4,38	5,61	7,59	0,77	1,15	1,64
3. ШПЦС + 4 % цемента + Muraplast FK 88	5,22	7,48	10,56	0,86	1,51	2,11
4. ШПЦС + 3 % цемента	3,11	3,94	4,95	0,43	0,49	0,85
5. ШПЦС + 3 % цемента + Powerflow 3195	3,87	5,19	7,32	0,75	0,91	1,53
6. ШПЦС + 3 % цемента + Muraplast FK 88	4,36	5,32	7,63	0,79	0,96	1,59

Анализ представленных данных демонстрирует, что образцы из щебеночно-песчаных смесей, модифицированных 4 % цемента и выдержанных в течение 3 суток, соответствуют марке по прочности М20, что подтверждается значениями предела прочности при сжатии ($R_{сж} \geq 2,0$ МПа) и предела прочности на растяжение при раскалывании ($R_{раст} \geq 0,3$ МПа). По истечении 7 суток наблюдается значительное улучшение

прочностных характеристик: образцы достигают марки М40 с пределом прочности при сжатии не менее 4,0 МПа и пределом прочности при раскалывании не менее 0,6 МПа, а также марки М70 с пределом прочности при сжатии не менее 7,0 МПа и пределом прочности при раскалывании не менее 1,0 МПа.

Введение стабилизатора «Powerflow 3195» в состав композиционного материала приводит к значительному увеличению предела прочности на сжатие на 54 %, что свидетельствует о существенном повышении его механических характеристик. Параллельно наблюдается рост предела прочности на растяжение при раскалывании на 80 %, что указывает на повышение деформативной способности материала. Этот эффект может быть объяснен улучшением микроструктуры материала, что подтверждается теоретическими расчетами и экспериментальными данными. Увеличение деформативной способности материала имеет важное практическое значение, поскольку оно снижает вероятность образования усадочных трещин, которые могут существенно ухудшить эксплуатационные свойства материала. Таким образом, применение стабилизатора «Powerflow 3195» способствует улучшению механических характеристик материала, что подтверждается комплексным анализом данных, включающим экспериментальные исследования и теоретические модели.

Наиболее значительное улучшение прочностных характеристик при компрессионных испытаниях было зафиксировано для щебеночно-песчаного цементно-стабилизированного материала, модифицированного стабилизатором «Muraplast FK 88». Относительное увеличение прочности составило до 67 %, что свидетельствует о существенном повышении прочностных свойств материала. Введение данного стабилизатора приводит к значительному улучшению реологических характеристик цементного теста и его устойчивости к внешним воздействиям, включая влагопоглощение. В результате модификации происходит повышение марки прочности с М60 до М100 при содержании цемента на уровне 4 %. Этот эффект способствует улучшению физико-механических свойств укрепленных материалов, что подтверждается результатами экспериментальных исследований.

Введение стабилизатора в состав щебеночно-песчаной смеси приводит к значительному повышению предела прочности на растяжение при раскалывании до 73 %. Аналогичные улучшения прочностных характеристик наблюдаются при модификации ЦПС 3 % цемента с добавлением функциональных добавок. Результаты проведенных испытаний визуализированы посредством построения диаграмм изменения предела прочности на сжатие и предела прочности на растяжение при раскалывании образцов, изготовленных из ЦПС, в зависимости от динамики набора прочности. Эти диаграммы представлены на рисунках 1 и 2 и позволяют наглядно оценить эффективность применяемых модифицирующих добавок и цемента в контексте повышения механических свойств материала.

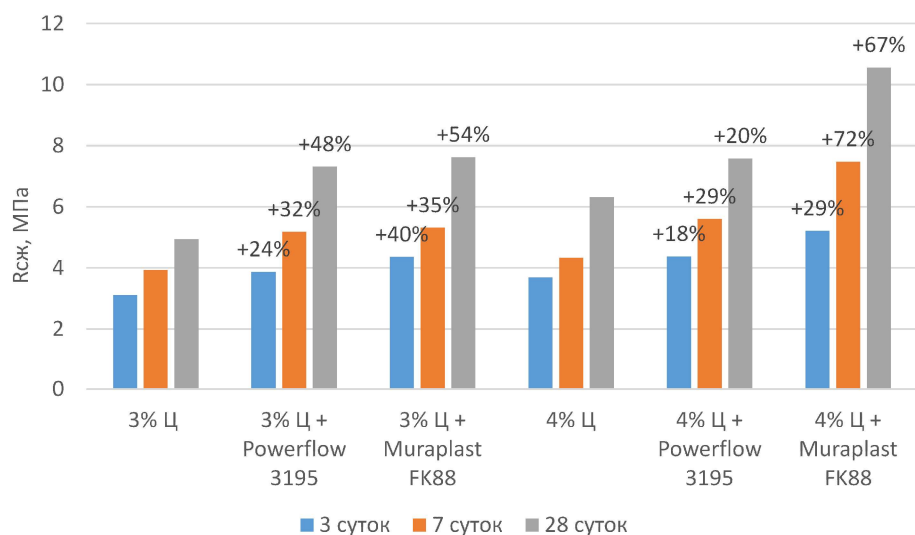


Рисунок 1 – Изменение предела прочности образцов на сжатие.

Таким образом, результаты комплексных исследований позволяют сделать вывод о том, что основным фактором, обуславливающим значительное повышение прочностных характеристик образцов является механизм действия модификаторов, которые, взаимодействуя с вяжущими компонентами цементной матрицы, ускоряют формирование первичного структурного каркаса, состоящего из двойных солей, гидратов и гидроксисолей. Этот каркас впоследствии обрастает гидросиликатами кальция, что приводит к

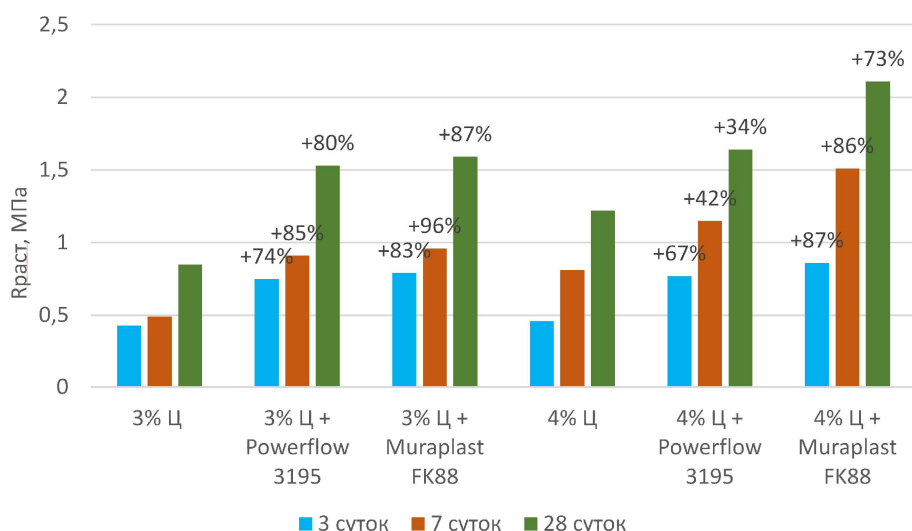


Рисунок 2 – Изменение предела прочности образцов на растяжение при раскалывании.

существенному улучшению физико-механических свойств материала. Данный процесс можно рассматривать как результат синергетического взаимодействия компонентов, что подтверждается результатами анализа микроструктуры и механических испытаний. Наличие первичного структурного каркаса существенно ускоряет процесс кристаллизации основных силикатных компонентов цементного камня на матричной фазе. Это явление, в свою очередь, способствует формированию более плотной и однородной микроструктуры, характеризующейся повышенной степенью сцепления между частицами заполнителя и цементным вяжущим. В результате наблюдается значительное повышение прочностных характеристик материала, что подтверждается результатами проведенных испытаний.

ВЫВОДЫ

На основании анализа можно сделать вывод, что применение исследуемых модифицирующих добавок в составе ЩПЦС приводит к ряду значимых преимуществ:

- способствует минимизации усадочных деформаций, что, в свою очередь, существенно повышает эксплуатационную надежность и долговечность дорожной конструкции, снижая вероятность преждевременного разрушения и увеличивая межремонтный интервал;
- оптимизация дозировки цемента на 20 % при сохранении проектной марки по прочности обеспечивает повышение качества материала за счет улучшения деформационных характеристик, что приводит к сокращению затрат времени и ресурсов на строительство, а также к увеличению срока службы дорожной одежды.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Разработка дорожно-строительного материала на основе обработанной цементом щебеночно-песчаной смеси оптимального гранулометрического состава / Л. Ф. Мавлиев [и др.]. // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. N 4 (50). С. 435-443. EDN RUEQJF.
2. Влияние добавок "ANT" и "Nanostab" на процессы структурообразования укрепленных минеральными вяжущими щебеночно-песчаных смесей / В. П. Матуа [и др.]. // Новые технологии. 2012. N 3. С. 80-84. URL: <https://lib.mkgtu.ru/images/stories/journal-nt/2012-03/015.pdf> (дата обращения: 16.03.2025).
3. Ядыкина В. В., Лукаш Е. А., Кондрашов Д. С. Влияние стабилизирующих добавок на свойства укрепленных портландцементом грунтов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2017. N 11. С. 6-10. DOI 10.12737/article_5a001aaaaee4b3.57860955. EDN ZUJXKR.
4. Меренцова Г. С., Дорошенко И. О. Особенности современной технологии устройства слоев оснований дорожных одежд из щебеночно-песчаных смесей, укрепленных портландцементом // Ползуновский альманах. 2023. N 1. С. 94-96. URL: <http://polzalmanah.ru/index.php/PA/issue/view/37/57> (дата обращения: 16.03.2025). ISSN 2782-6120 (Online).
5. Подбор состава укрепленных материалов для оснований автомобильных дорог с использованием золошлаковых смесей / Л. А. Урханова [и др.]. // Вестник ВСГУТУ. 2023. N 4 (91). С. 96-105. DOI 10.53980/24131997_2023_4_96. EDN LVMCYH.

6. Бедрин Е. А., Бедрина Е. А. Конкурентные преимущества инновационных материалов при устройстве укрепленных слоев дорожных одежд // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2019. Т. 16, N 1 (65). С. 52-61. URL: <https://vestnik.sibadi.org/jour/article/view/811/562> (дата обращения: 16.03.2025).
7. Хузиахметова К. Р., Коляндра Г. С. Применение обработанных щебеночно-песчаных смесей в основаниях дорожных одежд // Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура. 2023. N 4. С. 63-69. EDN NCIOXG.
8. Исследование влияния модификатора MADOR на показатели морозостойкости и водостойкости укрепленных цементом дисперсных материалов для дорожного строительства / Ф. В. Матвиенко [и др.]. // Научный журнал строительства и архитектуры. 2023. N 3 (71). С. 92-100. DOI 10.36622/VSTU.2023.3.71.010. EDN ZIVVNM.
9. Траутвайн А. И., Акимов А. Е. Анализ эффективности использования добавки комплексного действия при укреплении песчаных и крупнообломочных грунтов // Дороги и мосты. 2022. N 1 (47). С. 307-324. URL: https://rosdornii.ru/upload/iblock/e8a/jdx094j14p8d9f8njmosvat7dzltk53b/19.Trautvain_-Akimov_ANALIZ-EFFEKTIVNOSTI-ISPOLZOVANIYA-DOBAVKI-KOMPLEKSNOGO-DEYSTVIYA-PRI-UKREPLENI...pdf (дата обращения: 16.03.2025).
10. Исследование прочности песчаных грунтов, укрепленных цементом с добавкой "ДорЦем ДС-1", для использования при строительстве оснований автомобильных дорог / Т. И. Левкович [и др.]. // Транспортные сооружения. 2019. Т. 6, N 2. С. 8-20. DOI 10.15862/09SATS219. EDN XWJDFG.
11. Авдонин В. В., Ликомаскин А. И., Ерофеев В. Т. Исследование влияния химических добавок при комплексном методе укрепления цементом несвязных грунтов // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. 2011. N 14. С. 127-131. EDN VXJXPX.
12. Термодинамическая оценка активности соединений в цементных карбонатно-гидратационного твердения / С. П. Сивков [и др.]. // Стекло и керамика. 2022. Т. 95, N 9 (1137). С. 34-43. DOI 10.14489/glc.2022.09.pp.034-043. EDN HBIQCD.
13. Тараканов О. В. Химические добавки в растворы и бетоны: монография. Пенза: ПГУАС, 2016. 156 с.
14. ГОСТ Р 70455-2022. Дороги автомобильные общего пользования. Смесей щебеночно-гравийно-песчаные, обработанные неорганическими вяжущими. Общие технические условия. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 13 с.

REFERENCES

1. Mavliev, L.F., Vdovin, E.A., Kononov, N.V., Khuziahmetova, K.R. and Sharapova, N.B. (2019), "Development of Road-Building Material Based on Gravel-Sand-Cement Mixture with Optimal Granulometric Composition", *News Kazan State University of Architecture and Engineering*, no. 4 (50), pp. 435-443. EDN RUEQJF.
2. Matua, V.P., Mironchuk, S.A., Matua, R.V. and Blyagoz, A.M. (2012), "Effect of "ANT" and "Nanostab" Additives on the Structure Forming Processes of Crushed Stone and Sand Mixtures Strengthened with Mineral Bindings", *New Technologies*, no. 3, pp. 80-84, available at: <https://lib.mkgtu.ru/images/stories/journal-nt/2012-03/015.pdf> (Accessed 16 March 2025).
3. Yadykina, V.V., Lukash, E.A. and Kondrashov, D.S. (2017), "The Influence of Stabilizing Additives on the Properties of the Ground Strengthened by Cement", *Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*, no. 11, pp. 6-10. DOI 10.12737/article_5a001aaaae4b3.57860955. EDN ZUJXKR.
4. Merentsova, G.S. and Doroshenko, I.O. (2023), "Features of Modern Technology of Device of Layers of Path Bases from Crushed-Stone Mixtures Reinforced with Portland Cement", *Polzunovsky Almanah*, no. 1, pp. 94-96, available at: <http://polzalmanah.ru/index.php/PA/issue/view/37/57> (Accessed 16 March 2025). ISSN 2782-6120 (Online).
5. Urkhanova, L.A., Lkhasaranov, S.A., Bituev, A.V. and Smirnyagina, N.N. (2023), "Composition Selection of Reinforced Materials for Road Foundations using Mixes of Ash and Slag of Thermal Plants", *ESSUTM Bulletin*, no. 4 (91), pp. 96-105. DOI 10.53980/24131997_2023_4_96. EDN LVMCYH.
6. Bedrin, E.A., Bedrina, E.A. (2019), "Competitive Advantages of Innovative Materials while the Construction of Road Base Strengthened Layers", *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, vol. 16, no. 1 (65), pp. 52-61, available at: <https://vestnik.sibadi.org/jour/article/view/811/562> (Accessed 16 March 2025).
7. Khuziahmetova, K.R. and Kolyandra, G.S. (2023), "The Use of Treated Crushed Stone-Sand Mixtures in Road Pavement Bases", *Roads and Transport Infrastructure*, no. 4, pp. 63-69. EDN NCIOXG.
8. Matvienko, F.V., Panevin, N.I., Kanishchev, A.N. and Shapauskas, V.C. (2023), "Investigation of the Effect of the MADOR Modifier on the Indicators of Frost Resistance and Water Resistance Cement-Reinforced Dispersed Materials for Road Construction", *Russian Journal of Building Construction and Architecture*, no. 3 (71), pp. 92-100. DOI 10.36622/VSTU.2023.3.71.010. EDN ZIVVNM.
9. Trautvain, A.I. and Akimov, A.E. (2022), "Efficiency Analysis of Using Complex Action Additive when Strengthening Sandy and Macrofragmental Soils", *Roads and Bridges*, no. 1 (47), pp. 307-324, available at: https://rosdornii.ru/upload/iblock/e8a/jdx094j14p8d9f8njmosvat7dzltk53b/19.Trautvain_-Akimov_ANALIZ-EFFEKTIVNOSTI-ISPOLZOVANIYA-DOBAVKI-KOMPLEKSNOGO-DEYSTVIYA-PRI-UKREPLENI...pdf (Accessed 16 March 2025).
10. Levkovich, T.I., Mevlidinov, Z.A., Tuljankina, N.A. and Vishtalenko, M.V. (2019), "The Study of Strength of Sandy Soils Reinforced with Cement with the Addition of "DorZem DS-1", for Use in the Construction of Foundations of Roads", *Russian Journal of Transport Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 8-20. DOI 10.15862/09SATS219. EDN XWJDFG.

11. Avdonin, V.V., Likomaskin, A.I. and Erofeev, V.T. (2011), "Study of the Influence of Chemical Additives in the Complex Method of Cement Strengthening of Non-Cohesive Soils", *Bulletin of the Volga Regional Branch of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences*, no. 14, pp. 127-131. EDN VXJXPX.
12. Sivkov, S.P., Korchunov, I.V., Potapova, E.N., Dmitrieva, E.A. and Klimenko, N.N. (2022), "The Activity of Cement's Compounds in CO₂-Hydration Hardening Conditions from the Thermodynamic Point of View", *Glass and Ceramics*, vol. 95, no. 9 (1137), pp. 34-43. DOI 10.14489/glc.2022.09.pp.034-043. EDN HBIQCD.
13. Tarakanov, O.V. (2016), *Ximicheskie dobavki v rastvory i betony* [Chemical additives for solutions and concretes]: monograph, PSUAS, Penza, Russia.
14. National standard of the Russian Federation (2022), *GOST R 70455-2022: Dorogi avtomobil'nyye obshchego pol'zovaniya. Smesi shchebenochno-graviyno-peschanyye, obrabotannyye neorganicheskimi vyazhushchimi. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya* [GOST R 70455-2022: Public roads. Crushed stone-gravel-sand mixtures treated with inorganic binders. General specifications], Russian Institute of Standardization, Moscow, Russia.

Информация об авторах

Лукаш Евгений Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных и железных дорог им. А. М. Гридчина Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова, Белгород, Россия. Научные интересы: разработка материалов и технологий для создания укрепленных слоев дорожных одежд и земляного полотна автомобильных дорог.

Сушков Георгий Романович – магистрант кафедры автомобильных и железных дорог им. А. М. Гридчина Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова, Белгород, Россия. Научные интересы: разработка материалов и технологий для создания укрепленных слоев дорожных одежд и земляного полотна автомобильных дорог.

Information about the authors

Lukash Evgeny A. – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Department of Automobile roads and Railroads named after A. M. Gridchin, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russia. Scientific interests: development of materials and technologies for the creation of reinforced layers of road surfaces and roadbeds.

Sushkov Georgy R. – master's student, Department of Automobile roads and Railroads named after A. M. Gridchin, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russia. Scientific interests: development of materials and technologies for the creation of reinforced layers of road surfaces and roadbeds.

Вклад авторов:

Лукаш Е. А. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; написание исходного текста; итоговые выводы.

Сушков Г. Р. – доработка текста; итоговые выводы.

Contribution of the authors:

Lukash E. A. – scientific management; research concept; methodology development; writing the draft; final conclusions.

Sushkov G. R. – follow-on revision of the text; final conclusions.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 19.03.2025; одобрена после рецензирования 18.04.2025; принята к публикации 25.04.2025.

The article was submitted 19.03.2025; approved after reviewing 18.04.2025; accepted for publication 25.04.2025.