

Прочностные свойства обработанных неорганическим вяжущим щебеночно-песчаных смесей с использованием ускорителей твердения комплексного действия

Е.А. Лукаш, В.А. Гричаников, В.Г. Рогуленко, Е.В. Донцова

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, Россия

Резюме. Цель. Целью работы является исследование влияния добавок – ускорителей твердения «Fastkick 111» и «Centrament Rapid 151» на прочностные свойства ЦППС. **Метод.** Для комплексного анализа прочностных свойств ЦППС с использованием ускорителей набора прочности разработаны и испытаны цилиндрические образцы в соответствии с требованиями ГОСТ Р 70455-2022 «Смеси щебеночно-гравийно-песчаные, обработанные неорганическими вяжущими. Общие технические условия». **Результат.** Комплексное исследование прочностных характеристик образцов ЦППС в зависимости от дозировки цемента и ускорителей твердения комплексного действия позволило разработать оптимизированные рецептуры, обеспечивающие максимальную эксплуатационную надежность материала. Экспериментально установлено, что повышение содержания цемента в составе смесей приводит к пропорциональному увеличению его прочностных показателей. Максимальная прочность достигается при введении 4% цемента и 2,5% «Fastkick 111» в состав смеси. В 5-ти суточном возрасте наблюдается достижение марки по прочности М60, в 7-ми суточном – М70, в 28-ми суточном – М80. **Вывод.** Использование добавок при укреплении щебеночно-песчаных смесей способствует приросту прочности образцов на растяжение при раскалывании, что свидетельствует об улучшении трещиностойкости. Добавка «Fastkick 111» позволяет ускорить процесс укладки верхних слоев дорожной одежды, сокращая время ожидания до трех дней после уплотнения смеси; способствует снижению расхода цемента на 20% без ухудшения прочностных характеристик.

Ключевые слова: щебеночно-песчаная смесь, цемент, добавка, набор прочности, основание дорожной одежды

Для цитирования: Е.А. Лукаш, В.А. Гричаников, В.Г. Рогуленко, Е.В. Донцова. Прочностные свойства обработанных неорганическим вяжущим щебеночно-песчаных смесей с использованием ускорителей твердения комплексного действия. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026;53(1):224-232. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-224-232.

Strength properties of crushed stone-sand mixtures treated with inorganic binders using complex hardening accelerators

E.A. Lukash, V.A. Grichanikov, V.G. Rogulenko, E.V. Dontsova

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,
46 Kostyukova St., Belgorod 308012, Russia

Abstract. Objective. The aim of this study is to investigate the effect of two additives – the hardening accelerators «Fastkick 111» and «Centrament Rapid 151» on the strength properties of CSM. **Method.** To analyze the strength properties of crushed stone-gravel-sand mixtures using strength accelerators, cylindrical samples were developed and tested in accordance with the requirements of GOST R 70455-2022 "Crushed stone-gravel-sand mixtures treated with inorganic binders. General specifications". **Result.** A comprehensive study of the characteristics of CPCS samples depending on the dosage of cement and complex hardening accelerators made it possible to develop optimized formulations that ensure maximum material reliability. It has been

experimentally established that increasing the cement content in the composition of mixtures leads to a proportional increase in strength indicators. Maximum strength is achieved by adding 4% cement and 2.5% Fastkick 111 to the mixture. At 5 days, the mixture reaches M60 strength, at 7 days – M70, and at 28 days – M80. **Conclusion.** The use of additives in strengthening crushed stone-sand mixtures increases the tensile strength of samples, demonstrating improved crack resistance. The "Fastkick 111" additive accelerates the process of laying the top layers of the pavement, reducing the waiting time to three days after compaction; it also helps reduce cement consumption by 20% without compromising strength properties.

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

For citation: E.A. Lukash, V.A. Grichanikov, V.G. Rogulenko, E.V. Dontsova. Strength properties of crushed stone-sand mixtures treated with inorganic binders using complex hardening accelerators. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(1):224-232. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-224-232.

Введение. В России наблюдается активное развитие дорожной инфраструктуры. В связи с этим возрастает значимость технологий, основанных на передовых технических решениях, которые позволяют эффективно использовать местные укрепленные грунты и обработанные материалы для формирования дорожных покрытий. Эти инновационные методы способствуют решению ключевых задач, таких как улучшение транспортной доступности, повышение экологической устойчивости и стимулирование социально-экономического развития регионов [1]. Для оптимизации реологических характеристик верхнего слоя дорожного покрытия с целью повышения его общей упругости и минимизации накопления остаточных деформаций рекомендуется внедрение конструктивных слоев оснований, изготовленных из щебеночно-песчаных смесей, модифицированных различными вяжущими материалами. Такой подход позволяет значительно улучшить прочностные характеристики дорожной конструкции, повысить ее устойчивость к динамическим и эксплуатационным воздействиям, а также обеспечить долговечность и надежность дорожного покрытия в условиях интенсивной транспортной нагрузки [2].

Укрепление – комплекс мер, направленных на обработку смеси щебня, гравия и песка с применением неорганических вяжущих, что повышает их физико-механические характеристики [3]. Заметные успехи в указанной области были достигнуты благодаря применению минеральных вяжущих веществ [4-11]. Однако использование их в исходном состоянии связано с серьезными недостатками, снижающими эффективность обработки грунтовых оснований. Одним из ключевых факторов является невысокая устойчивость к образованию трещин в укрепленных материалах, особенно при высоких показателях прочности. Данная проблема обусловлена низкой деформационной способностью связующих компонентов, ограничивающей их способность адаптироваться к объемным изменениям грунта под влиянием разных типов нагрузки. Плохая водоустойчивость минеральных вяжущих вынуждает увеличивать объемы используемых добавок для достижения нужных технических показателей, что ведет к существенному удорожанию строительства. В отдельных ситуациях, особенно при обработке специфичных грунтов с особыми инженерно-геологическими характеристиками, достижение необходимой устойчивости к воздействию низких температур представляет собой сложную проблему, требующую инновационного подхода и комплексных мер.

Для ее решения необходимо применять комплексный подход, включающий инновационные технологические решения и методы, направленные на повышение устойчивости укрепленных материалов к циклическим температурным изменениям [12]. В ходе гидратации и последующей кристаллизации цементного вяжущего материала осуществляются комплексные физико-химические трансформации, которые оказывают существенное влияние на усадочные процессы в щебеночно-песчано-цементных смесях (ЩПЦС).

Постановка задачи. Существуют два ключевых этапа формирования цементных композиций, сопровождающихся химическими реакциями воды с минеральными

составляющими цемента. На начальном этапе молекулы воды взаимодействуют с минералами цемента, образуя новые гидратные соединения. Эти соединения имеют меньший объем по сравнению с первоначальной массой реагентов. Вследствие этого возникает явление усадки, приводящее к образованию внутренних напряжений внутри материала.

По мере дальнейшего протекания процесса гидратации формируются кристаллы новых фазовых соединений. Их рост способствует уменьшению интенсивности усадочных явлений, поскольку структура становится более стабильной и устойчивой [13]. Процессы взаимодействия воды с цементом играют ключевую роль в формировании качественных характеристик бетона и прочих композитных материалов на его основе. Понимание особенностей каждого этапа позволяет оптимизировать состав смесей и технологию производства, обеспечивая высокую прочность и устойчивость сооружений.

Методы исследования. Выделяют несколько ключевых методов для снижения вероятности появления начальных усадочных трещин в ЩПЦС: оптимизация состава, использование специальных технологических приемов и применение модифицирующих добавок. Целью оптимизации состава является достижение оптимального баланса прочности, пластичности и устойчивости к образованию трещин. Достигается за счет подбора правильных соотношений компонентов и обеспечения достаточного водоцементного отношения для предотвращения чрезмерной потери влаги и образования дефектов. Специальные технологические приемы предполагают увлажнение среды при тепловой обработке с последующим регулярным увлажнением поверхности. Поддержание влажности окружающей среды предотвращает быстрое испарение влаги из поверхностного слоя смеси, уменьшая риск возникновения трещин. Нанесение тонкого слоя воды или водно-дисперсных растворов создает защитный барьер, предотвращающий потерю влаги, что обеспечивает равномерное протекание процесса усадки и нивелирует напряжения, возникающие в результате данного явления.

Увлажнение среды является эффективным методом оптимизации термообработки, способствующим повышению качества конечного продукта и снижению вероятности дефектов. Введение пластификаторов, воздухововлекающих аддитивов и гидрофобизаторов в состав бетонной смеси оказывает значительное влияние на ее реологические характеристики, существенно повышая пластичность и снижая коэффициент усадки. Компоненты играют ключевую роль в оптимизации процессов твердения, обеспечивая более точный контроль за параметрами кристаллизации цементного камня. Данный подход позволяет минимизировать образование усадочных трещин, что, в свою очередь, способствует повышению долговечности и эксплуатационных характеристик бетонных конструкций. При формировании многослойных дорожных оснований, состоящих из щебеночно-песчаных смесей, модифицированных цементом, требуется обязательное соблюдение технологического перерыва. Временной интервал является критически важным для достижения требуемой марки прочности материала, что обеспечивает долговечность и надежность дорожного покрытия. Его реализация сопряжена с существенными временными и финансовыми затратами, что значительно увеличивает общие сроки и стоимость строительства. Исследования, представленные в работах [14-18], подтверждают высокую эффективность предложенного подхода к минимизации усадочных трещин, что делает его актуальным и перспективным для практического применения в современном строительстве. В связи с этим возникла необходимость изучения воздействия добавок «Fastkick 111» и «Centrament Rapid 151» на физико-механические свойства ЩПЦС. Основные характеристики добавок представлены в табл. 1. Данные добавки играют ключевую роль в формировании кристаллизационных и коагуляционных связей, обеспечивая структурную прочность и долговечность композиционных материалов. Их использование в сочетании с минеральными вяжущими веществами представляет собой оптимальное решение для достижения высоких физико-механических характеристик конечного продукта.

Таблица 1. Характеристики стабилизирующих добавок
Table 1. Characteristics of stabilizing additives

Описание Description	Наименование добавки Additive name	
	Fastkick 111	Centrament Rapid 151
Особенности применения Features of application	Является высокоэффективным ускорителем твердения бетона в раннем возрасте/ Highly effective concrete hardening accelerator. Повышает раннюю прочность бетона, твердеющего в естественных условиях и условиях ТВО/Increases early strength of concrete. Позволяет сократить продолжительность цикла, снизить максимальную температуру либо полностью отказаться от проведения ТВО/ Allows to reduce cycle time. Увеличивает связность бетонных смесей Increases the cohesion of concrete mixtures. Обладает суперпластифицирующим и суперводоредуцирующим эффектом It has a superplasticizing and superwater-reducing effect	Сильный ускоряющий эффект при любых режимах ТВО и ТО/Strong accelerating effect in any heat and power supply modes. Добавка позволяет стабилизировать бетонные смеси при применении некачественных заполнителей (оптимально работает на любых расходах цемента от 100 кг до 550 кг)/The additive helps stabilize concrete mixtures. Не содержит компонентов (хлора, аммиака), вызывающих коррозию арматуры/Does not contain components (chlorine, ammonia) that cause corrosion of reinforcement. Высокая эффективность при низком расходе цемента/High efficiency with low cement consumption. Не снижает раннюю прочность/Does not reduce early strength. Не увеличивает водопотребность/Does not increase water demand.
Внешний вид Appearance	Жидкость коричневого цвета Brown liquid	
Дозировка % от массы цемента Dosage	2,0 – 4,0	0,5 – 2,5
Транспортировка и хранение Transportation and storage	В оригинальной упаковке. Не допускается замораживание In original packaging. Do not freeze.	

Внедрение таких модификаторов способствует значительному снижению расхода вяжущего компонента, ускорению кинетики твердения и минимизации риска возникновения усадочных дефектов. Гидратационное твердение минеральных вяжущих материалов представляет собой сложный физико-химический процесс, связанный с последовательными стадиями растворения, химического взаимодействия и кристаллизации. Процесс начинается с контакта сухих вяжущих веществ с водой, вследствие которого компоненты вяжущего (например, цемент) переходят в состояние водных растворов. Образующиеся растворы содержат активные ингредиенты, вступающие в дальнейшие химические реакции.

Следующая важная стадия – диффузионное проникновение молекул воды внутрь кристаллической решетки компонентов вяжущего. Это запускает цепочку химических преобразований, результатом которых становится образование гидратированных соединений. Новообразованные гидраты формируют первоначальные аморфные структуры, постепенно увеличивающие свою упорядоченность и пространственное распределение. По мере развития процесса нарастают межфазные контакты, укрепляются молекулярные связи, что способствует созданию прочной сетчатой структуры. Ключевым этапом является зарождение и рост кристаллов гидратов. Они увеличивают плотность сформировавшейся структуры, уменьшают количество пустот и повышают общую прочность системы. Конечный продукт гидратации представляет собой сложную систему, характеризующуюся наличием прочно сцепленных кристаллических образований, создающих жесткую конструкцию. Гидратационная реакция протекает поэтапно, начиная с проникновения воды в структуру вяжущего вещества и заканчивая формированием стабильных и прочных кристаллических фаз. В результате образуется прочный строительный материал, обладающий высокими эксплуатационными характеристиками и длительным сроком службы [19]. Гидратационное твердение цементных составов играет ключевую роль в строительной отрасли, поскольку определяет конечную прочность и долговечность возводимых сооружений. Применение специализированных добавок, таких как соли кальция, заметно ускоряет этот процесс, улучшая характеристики набора прочности материалами. Механизм влияния добавок основан на двух ключевых аспектах – интенсификация растворения клинкерных минералов и формирование двойных солей. Компоненты клинкера, такие как алит и белит, вступают в реакцию с водой, образуя гель-фазы, регулируя скорость гидратации. Кальцийсодержащие

добавки активизируют процессы растворения и взаимодействия клинкерных частиц, что ускоряет начало гидратации. Если концентрация добавок превышает оптимальное значение, они начинают реагировать с гидроксидом кальция, создавая устойчивые комплексы. Это повышает растворимость основных минералов клинкера, ускоряя темп гидратации [20].

Обсуждение результатов. 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 табл.2. Для проведения исследований изготовлены цилиндрические образцы диаметром 100 мм и высотой 120 мм, которые после завершения формования набирали прочность в условиях естественного температурно-влажностного режима.

Таблица 2. Составы щебеночно-песчано-цементных смесей

Table 2. Compositions of crushed stone-sand-cement mixtures

№ п/п	Состав смесей, % Composition of mixtures				Содержание добавок от цемента, % Content of cement additives	
	Щебень Crushed stone	Песок Sand	Цемент Cement	Вода Water	Fastkick 111	Centrament Rapid 151
1	60	36	4	2,5		
2	60	36	4	2,5	2,0 – 4,0	
3	60	36	4	2,5		0,5 – 2,5

В табл. 3 и 4 приведены результаты испытаний щебеночно-песчаных смесей, укрепленных цементом. В смесях варьировалась концентрация добавок. Данные представлены для двух временных периодов: 7 и 28 суток. Исследование данных показывает, что при введении добавки «Fastkick 111» в дозировке 2,5% образцы из щебеночно-песчаных смесей, укрепленных 4% цемента, достигают прочности, соответствующей марке М70 ($R_{сж} = 7,16$ МПа), что составляет 88% от проектной прочности через 28 дней твердения.

Таблица 3. Прочность образцов в возрасте 7 и 28 суток при различной концентрации добавки Fastkick 111

Table 3. Strength of samples at 7 and 28 days of age with different concentrations of Fastkick 111 additive

Концентрация добавки в бетонной смеси, % от массы цемента Concentration of additive in concrete mix, % of cement mass	Прочность при сжатии на 7 сутки, МПа Compressive strength at 7 days, MPa	Прочность при сжатии на 28 сутки, МПа Compressive strength at 28 days, MPa	Прочность при сжатии на 7 сутки, % от 28-ми суточной Compressive strength at 7 days, % of 28 days
0	4,31	6,32	68,2
2,0	4,64	7,84	59,1
2,5	7,16	8,10	88,4
3,0	6,81	7,32	93,0
3,5	6,67	8,29	80,5
4,0	6,11	6,68	91,5

Таблица 4. Прочность образцов в возрасте 7 и 28 суток при различной концентрации добавки Centrament Rapid 151

Table 4. Strength of samples at 7 and 28 days of age with different concentrations of Centrament Rapid 151 additive

Концентрация добавки в бетонной смеси, % от массы цемента Concentration of additive in concrete mix, % of cement mass	Прочность при сжатии на 7 сутки, МПа Compressive strength at 7 days, MPa	Прочность при сжатии на 28 сутки, МПа Compressive strength at 28 days, MPa	Прочность при сжатии на 7 сутки, % от 28-ми суточной Compressive strength at 7 days, % of 28 days
0	4,31	6,32	68,2
0,5	4,28	6,48	66,1
1,0	4,46	6,79	65,7
1,5	4,59	6,92	66,3
2,0	4,63	7,06	65,6
2,5	4,47	6,83	65,4

Добавка «Centrament Rapid 151» не обеспечивает значительного повышения прочности бетона. При концентрации 2% она увеличивает прочность лишь до 4,63 МПа через 7 дней после твердения. Дальнейшие исследования проводились с ускорителем

набора прочности «Fastkick 111» в количестве 2,5% от массы цемента. Результаты представлены в табл. 5. Анализ данных показывает, что образцы щебеночно-песчаных смесей, обработанные 4% цемента и выдержанные в течение 3 суток, соответствуют марке прочности М20. Это 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).

Таблица 5. Прочность образцов с добавкой Fastkick 111
Table 5. Strength of samples with the addition of Fastkick 111

Наименование смеси Name of the mixture	Прочность, МПа, в зависимости от времени твердения образцов Strength, depending on the curing time of samples					
	сжатие $R_{сж}$ на растяжение при раскалывании $R_{раст}$			compression $R_{сжатия}$ tensile strength during splitting $R_{stretch}$		
	1 сутки	2 суток	3 суток	5 суток	7 суток	28 суток
ЩПС+4% цемента	<u>0,97</u> 0,07	<u>1,79</u> 0,22	<u>3,09</u> 0,46	<u>3,74</u> 0,61	<u>4,31</u> 0,81	<u>6,32</u> 1,22
ЩПС+4% цемента+ 2,5% Fastkick111	<u>2,19</u> 0,31	<u>3,88</u> 0,51	<u>5,54</u> 0,78	<u>6,47</u> 1,15	<u>7,16</u> 1,22	<u>8,10</u> 1,63

Через 7 суток наблюдается значительное улучшение характеристик: образцы достигают марки М40 с пределом прочности при сжатии не менее 4,0 МПа и пределом прочности на растяжение при раскалывании не менее 0,6 МПа. По истечении 28 суток прочность возрастает до марки М60, с пределом прочности при сжатии не менее 6,0 МПа и пределом прочности на растяжение при раскалывании не менее 0,9 МПа. Введение добавки «Fastkick 111» в состав композиционного материала приводит к значительному увеличению предела прочности на сжатие на 28%, что свидетельствует о существенном повышении его механических характеристик. Параллельно наблюдается рост предела прочности на растяжение при раскалывании на 33%, что указывает на повышение деформативной способности материала. Эффект может быть объяснен улучшением микроструктуры материала, что подтверждается теоретическими расчетами и экспериментальными данными. Увеличение деформативной способности материала имеет важное практическое значение, поскольку снижает вероятность образования усадочных трещин, которые могут существенно ухудшить эксплуатационные свойства материала. Применение стабилизатора «Fastkick 111» способствует улучшению механических характеристик материала, что подтверждается комплексным анализом данных, включающим экспериментальные исследования и теоретические модели.

Результаты проведенных испытаний визуализированы посредством построения диаграмм изменения предела прочности на сжатие и предела прочности на растяжение при раскалывании образцов, изготовленных из ЩПС, в зависимости от динамики набора прочности. Диаграммы представлены на рис. 1, 2 и позволяют оценить эффективность модифицирующей добавки и цемента в контексте повышения механических свойств материала. Через 3-е суток прочность материала с использованием добавки «Fastkick 111» увеличивается и составляет от марочной 87% - при сжатии и 64% - на растяжение при раскалывании.

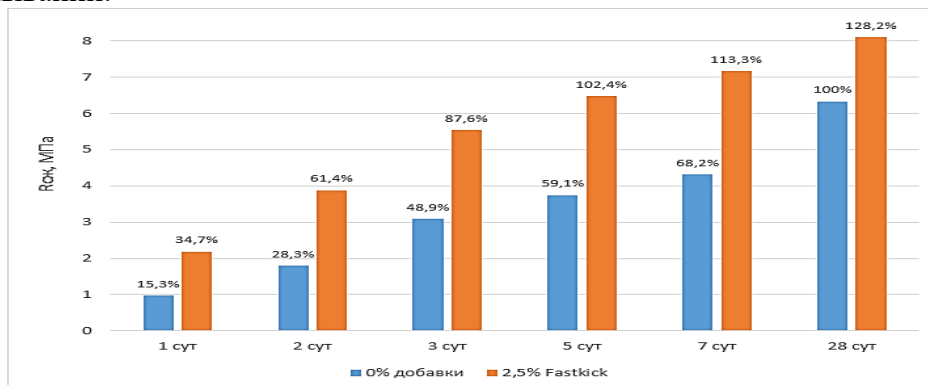


Рис. 1 – Изменение предела прочности при сжатии
Fig. 1 – Change in compressive strength

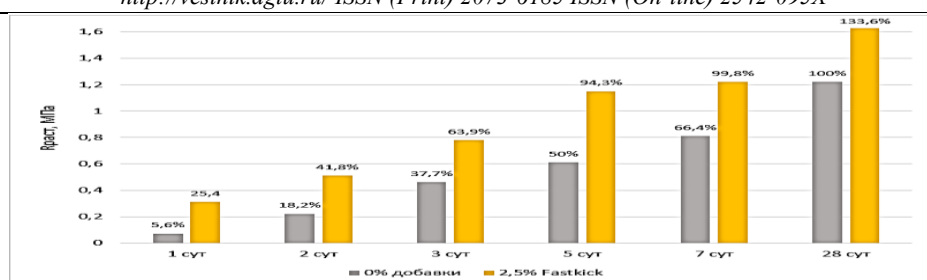


Рис. 2 – Изменение предела прочности на растяжение при раскалывании
Fig. 2 – Change in tensile strength at splitting

Результаты свидетельствуют о возможном сокращении технологического перерыва и продолжении укладки вышележащих слоев дорожной одежды. В 5-ти суточном возрасте наблюдается достижение марки по прочности М60, в 7-ми суточном – М70, в 28-ми суточном – М80. Комплексные исследования показывают, что модификатор играет ключевую роль в повышении прочности образцов. Это достигается благодаря активному взаимодействию модификатора с составляющими цементной смеси, которое стимулирует быстрое образование первичной структуры, включающей двойные соли, гидраты и гидроксисоли. Впоследствии эта структура дополнительно укрепляется за счет формирования слоя гидросиликатов кальция, что значительно усиливает механические свойства готового изделия. Благодаря ускорению процесса кристаллизации силикатных составляющих цементного камня на поверхности матриц, формируется плотная и равномерная внутренняя структура с улучшенным сцеплением наполнителя и связующего вещества. Итогом комплексного воздействия является существенное увеличение прочностных характеристик материала, что подтверждено лабораторными испытаниями.

Вывод. Анализ физико-механических параметров укрепленных портландцементом щебеночно-песчаных смесей с применением добавок «Fastkick 111» и «Centrament Rapid 151» демонстрирует полное соответствие установленным требованиям ГОСТ Р 70455-2022. Применение указанных добавок при укреплении щебеночно-песчаной смеси позволяет значительно уменьшить усадочные деформации. Это существенно повышает надежность и долговечность дорожного покрытия, снижает риск преждевременного разрушения и увеличивает интервал между ремонтами.

В ходе сравнительного анализа эффективности добавок по совокупности регламентированных физико-механических характеристик укрепленного материала, с учетом оптимального соотношения компонентов, был выявлен наиболее результативный состав, включающий 4% цемента и 2,5% «Fastkick 111». Данный вывод подтверждается комплексным подходом к оценке стабилизирующих свойств, что позволяет сделать обоснованное заключение о превосходстве указанного состава над альтернативными вариантами.

Добавка «Fastkick 111» позволяет ускорить процесс укладки верхних слоев дорожной одежды, сокращая время ожидания до трех дней после уплотнения смеси; способствует снижению расхода цемента на 20% без ухудшения прочностных характеристик.

Библиографический список:

1. 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. № 3 (173). С. 87-94. DOI: 10.71536/vd.2025.3c173.9.
2. Слободчикова Н.А., Ключев С.В., Плюта К.В. Зависимость модуля упругости грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими, от прочности на сжатие // Вестник СиБАДИ. 2024. Т. 21, № 5. С. 786-800. DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-5-786-800.
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. № 11. С. 6-10.
4. Меренцова Г.С., Дорошенко И.О. Особенности современной технологии устройства слоев оснований дорожных одежд из щебеночно-песчаных смесей, укрепленных портландцементом // Ползуновский альманах. 2023. № 1. С. 94-96.

5. Урханова Л.А., Лхасаранов С.А., Битуев А.В., Смирнягина Н.Н. Подбор состава укрепленных материалов для оснований автомобильных дорог с использованием золошлаковых смесей // Вестник ВСГУТУ. 2023. № 4 (91). С. 96-105.
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, № 1 (65). С. 52-61.
7. Хузиахметова К.Р., Коляндра Г.С. Применение обработанных щебеночно-песчаных смесей в основаниях дорожных одежд//Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура. 2023.№ 4.С.63-69.
8. Лофлер М., Слободчикова Н.А. Методики подбора составов грунтов, укрепленных известью, для дорожного строительства // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2018. Т. 8. № 2. С. 141-147. DOI: 10.21285/2227-2917-2018-2-141-147.
9. Симчук Е.Н., Жданов К.А., Зарифов Р.Р. Исследование эффективности комплексных минеральных вяжущих в укреплении грунтов для дорожных конструкций//Дороги и мосты. 2023. № 2(50).С.309-322.
10. Подольский Вл.П., Матвиенко Ф.В., Строкин А.С., Борисов А.Е. Исследование влияния модификатора "ДОРЦЕМ ДС-1" на свойства цемента и физико-механические характеристики цементогрунта // Научный журнал строительства и архитектуры. 2017. № 1 (45). С. 84-92.
11. Меджидов Р.А., Магомедов Р.Я., Мурадалиев З.З. Цементация грунта в дорожном строительстве // Естественные и технические науки. 2024. № 3 (190). С. 133-135.
12. Матвиенко Ф.В., Паневин Н.И., Канищев А.Н., Шапаускас В.С. Исследование влияния модификатора MADOR на показатели морозостойкости и водостойкости укрепленных цементом дисперсных материалов для дорожного строительства // Научный журнал строительства и архитектуры. 2023. № 3 (71). С. 92-100.
13. Матуа В.П., Мирончук С.А., Матуа Р.В., Блягоз А.М. Влияние добавок "ANT" и "Nanostab" на процессы структурообразования укрепленных минеральными вяжущими щебеночно-песчаных смесей // Новые технологии. 2012. № 3. С. 80-84.
14. Траутвайн А.И., Акимов А.Е. Анализ эффективности использования добавки комплексного действия при укреплении песчаных и крупнообломочных грунтов//Дороги и мосты.2022.№ 1(47).С.307-324.
15. Левкович Т.И., Мевлидинов З.А., Тулянкина Н.А., Вишталенко М.В. Исследование прочности песчаных грунтов, укрепленных цементом с добавкой "ДорЦем ДС-1", для использования при строительстве оснований автомобильных дорог // Транспортные сооружения. 2019. Т. 6. № 2. С. 8-20.
16. 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. № 14. С. 127-131.
17. Коновалова Н.А., Дабижа О.Н., Панков П.П. Структурообразование цементогрунтов в присутствии стабилизирующей добавки криогелит // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2017. № 8 (704). С. 63-73.
18. Меренцова Г.С., Медведев Н.В., Добрынина А.А. Стабилизация грунтов рабочего слоя земляного полотна с применением полимерно-минеральной добавки "NICOFLOK" // Ползуновский альманах. 2022. № 1. С. 133-135.
19. Сивков С.П., Корчунов И.В., Потапова Е.Н., Дмитриева Е.А., Клименко Н.Н. Термодинамическая оценка активности соединений в цементах карбонатно-гидратационного твердения // Стекло и керамика. 2022. Т. 95, № 9 (1137). С. 34-43.
20. Сергеева А.М., Полякова Т.А. Улучшение эксплуатационных показателей покрытий грунтовых дорог путем применения добавок (стабилизаторов) // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2021. Том 11. № 2А. С. 179-185. DOI: 10.34670/AR.2021.28.89.022.

References:

1. 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*. 2025; 3 (173): 87-94. DOI: 10.71536/vd.2025.3c173.9.
2. Slobodchikova N.A., Klyuev S.V., Plyuta K.V. Dependence of the soils' elastic modulus reinforced with inorganic binders on compressive strength. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (5): 786-800. DOI:10.26518/2071-7296-2024-21-5-786-800.
3. Yadykina V.V., Lukash E.A., Kondrashov D.S. The influence of stabilizing additives on the properties of the ground strengthened by cement. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2017;11: 6-10.
4. Merentsova G.S., Doroshenko I.O. Features of modern technology for the construction of road base layers from crushed stone-sand mixtures reinforced with Portland cemen. *Polzunovsky almanac*. 2023; 1: 94-96.
5. Urkhanova L.A., Lkhasaranov S.A., Bituev A.V., Smirnyagina N.N. Composition selection of reinforced materials for road foundations using mixes of ash and slag of thermal plants. *VSGUTU Bulletin*. 2023;4 (91):96-105.

6. Bedrin E.A., Bedrina E.A. Competitive advantages of innovative materials while the construction of road base strengthened layers//The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2019;vol16,1(65):52-61.
7. Khuziakhmetova K.R., Kolyandra G.S. The use of treated crushed stone-sand mixtures in road pavement bases. *Roads and transport infrastructure*. 2023; 4: 63-69.
8. Lofler M., Slobodchikova N.A. Methods for reinforcing soil compositions with lime for road construction *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2018; 8 (2): 141-147. DOI: 10.21285/2227- 2917-2018-2-141-147.
9. Simchuk E.N., Zhdanov K.A., Zarifov R.R. Study of the efficiency of hydraulic road binders in soil stabilization for road structures. *Roads and Bridges*. 2023; 2 (50): 309-322.
10. Podol'skii V.I.P., Matvienko F.V., Strokin A.S., Borisov A.E. Study of the effect of the «DORCEM DS-1» modifier on the properties of cement and physical and mechanical characteristics of cement foundations. *Scientific journal of construction and architecture*. 2017; 1 (45): 84-92.
11. Medzhidov R.A., Magomedov R.YA., Muradaliev Z.Z. Soil cementation in road construction. *Natural and technical sciences*. 2024; 3 (190): 133-135.
12. Matvienko F.V., Panevin N.I., Kanishchev A.N., Shapauskas V.C. 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*. 2023;3(71): 92-100.
13. Matua V.P., Mironchuk S.A., Matua R.V., Blyagoz A.M. Effect of "ANT" and "Nanostab" additives on the structure forming processes of crushed stone and sand mixtures strengthened with mineral bindings. *New technologies*. 2012;3: 80-84.
14. Trautvain A.I., Akimov A.E. Efficiency analysis of using complex action additive when strengthening sandy and macrofragmental soils. *Roads and Bridges*. 2022; (47): 307-324.
15. Levkovich T.I., Mevlidinov Z.A., Tuljankina N.A., Vishtalenko M.V. 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. *Transport facilities*. 2019; 6(2): 8-20.
16. Avdonin V.V., Likomaskin A.I., Erofeev V.T. 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*. 2011; 14: 127-131.
17. Konovalova N.A., Dabizha O.N., Pankov P.P. Structural formation of cementogronts in the presence of stabilizing additive cryogelite. *News of higher educational institutions. Construction*. 2017;8 (704): 63-73.
18. Merentsova G.S., Medvedev N.V., Dobrynina A.A. Stabilization of soils of the working layer of the roadbed using the polymer-mineral additive "NICOFLOK". *Polzunovsky almanac*. 2022; 1: 133-135.
19. Sivkov S.P., Korchunov I.V., Potapova E.N., Dmitrieva E.A., Klimenko N.N. The activity of cements compounds in CO₂-hydration hardening conditions from the thermodynamic point of view. *Glass and ceramics*. 2022; 95, 9 (1137): 34-43.
20. Sergeeva A.M., Polyakova T.A. Improving the performance of dirt road surfaces by using additives (stabilizers). *Economy: yesterday, today, tomorrow*. 2021;11(2A): 179-185. DOI: 10.34670/AR.2021.28.89.022.

Сведения об авторах:

Лукаш Евгений Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных и железных дорог им. А.М. Гридчина; svh8@yandex.ru

Гричаников Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных и железных дорог им. А.М. Гридчина; forvag1@yandex.ru

Рогуленко Виталий Геннадиевич, магистрант кафедры автомобильных и железных дорог им. А.М. Гридчина; vroguenko.2985@mail.ru

Донцова Евгения Владимировна, магистрант кафедры автомобильных и железных дорог им. А.М. Гридчина; jecan@yandex.ru

Information about authors:

Evgeny A. Lukash, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Automobile roads and Railroads named after A.M. Gridchin; svh8@yandex.ru

Vladimir A. Grichanikov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc.Prof., Department of Automobile roads and Railroads named after A.M. Gridchin; forvag1@yandex.ru

Vitaly G. Rogulenko, Master's student, Department of Automobile roads and Railroads named after A.M. Gridchin; vroguenko.2985@mail.ru

Evgeniya V. Dontsova, Master's student, Department of Automobile roads and Railroads named after A.M. Gridchin; jecan@yandex.ru

Конфликт интересов / Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 27.09.2025.

Одобрена после рецензирования/Reviced 30.10.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 28.01.2026.