

УДК: 691.1:004
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.33
EDN: UULLKA



Повышение степени уплотнения укрепленных грунтов в основаниях автомобильных дорог

Д.Е. Барабаш¹, Н.С. Перова¹

¹ Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Повышение степени уплотнения укрепленных грунтов в основаниях автомобильных дорог является ключевым фактором долговечности и надёжности дорожных конструкций. Улучшение качества автомобильных дорог зависит от множества составляющих, в числе которых – научно обоснованные технологии уплотнения дорожных оснований. В этой связи целью исследования является разработка методики укрепления супесчаных грунтов комплексными органоминеральными добавками на основе растворов поливинилового спирта и тринатрийфосфата, обеспечивающих требуемую степень уплотнения конструктивных слоев дорожных конструкций. Задачи исследования: исследовать изменение вязкости укрепляющей добавки, состоящей из раствора поливинилового спирта и тринатрийфосфата, при различной концентрации компонентов; установить влияние количества укрепляющей добавки на водопоглощение и прочность при сжатии укрепленных грунтов, провести опытно-промышленную отработку технологии уплотнения супесчаных грунтов с применением разработанной методики укрепления грунтов на опытных участках дорожных конструкций.

Результаты. Предложена методика укрепления супесчаных грунтов на основе использования укрепляющих добавок из ПВС и Na_3PO_4 , обеспечивающих достижение требуемых физико-механических свойств и степени уплотнения конструктивных слоев дорожных конструкций. По полученным зависимостям изменение вязкости укрепляющей добавки для грунтов установлено рационального сочетания компонентов, укрепление которыми показывает целесообразность их использования в дорожном строительстве. Опытно-промышленная проверка разработанной методики укрепления супесчаных грунтов на основе использования разработанных добавок подтвердила возможность повышения эффективности уплотнения конструктивных слоев дорожных конструкций.

Выводы. Разработанная методика укрепления супесчаных грунтов комплексными органоминеральными добавками вносит вклад в повышение качества и долговечности дорожных конструкций, снижая затраты на строительство и расширяя возможности строительства в сложных условиях. Это способствует реализации задач по созданию безопасной и качественной дорожной инфраструктуры.

Ключевые слова: супесь, укрепление грунтов, поливиниловый спирт, тринатрийфосфат, вязкость, физико-механические свойства, степень уплотнения.

Для цитирования: Барабаш Д.Е., Перова Н.С. Повышение степени уплотнения укрепленных грунтов в основаниях автомобильных дорог // Известия КГАСУ, 2026, № 1 (75), с. 406-415, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.33, EDN: UULLKA

Increasing the degree of compaction of strengthened soils in subgrade of roads

D.E. Barabash¹, N.S. Perova¹

¹ Military educational and scientific center of the Air Forces «Military-air academy named after prof. Zhukovsky and Ju.A.Gagarin», Voronezh, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* Increasing the degree of compaction of reinforced soils in the subgrade of highways is a key factor in the durability and reliability of road structures. Improving the quality of highways depends on many components, including scientifically sound technologies for compacting subgrade. In this regard, the purpose of the study is to develop a technique for strengthening sandy loam soils with complex organomineral additives based on solutions of polyvinyl alcohol and trisodium phosphate, which provide the required degree of compaction of the structural layers of road structures. Research tasks: To study the change in viscosity of a strengthening additive consisting of a solution of polyvinyl alcohol and trisodium phosphate at different component concentrations; to determine the effect of the amount of strengthening additive on the water absorption and compressive strength of strengthened soils; to conduct pilot testing of the technology for compacting sandy loam soils using the developed soil strengthening technique on test sections of road structures. *Results.* A method for strengthening sandy loam soils is proposed using strengthening additives made from PVA and Na₃PO₄, ensuring the required physical and mechanical properties and compaction degree of the structural layers of road structures. Based on the obtained dependences on the viscosity of the soil strengthening additive, a rational combination of components was established, the strengthening of which demonstrates the feasibility of their use in road construction. A pilot test of the developed method for strengthening sandy loam soils using the developed additives confirmed the feasibility of increasing the compaction efficiency of the structural layers of road structures. *Conclusions.* The developed method of strengthening sandy loam soils with complex organomineral additives makes a significant contribution to the road industry, improving the quality and durability of road structures, reducing construction costs and expanding the possibilities of construction in difficult conditions. This contributes to the implementation of the tasks of creating a safe and high-quality road infrastructure.

Keywords: sandy loam, soil strengthening, polyvinyl alcohol, trisodium phosphate, viscosity, physical and mechanical properties, degree of compaction..

For citation: Barabash D.E., Perova N.S. Increasing the degree of compaction of strengthened soils in subgrade of roads// News of KSUAE, 2026, № 1(75), p. 406-415, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.33, EDN: UULLKA

1. Введение

Улучшение качества автомобильных дорог в Российской Федерации – это государственная задача. Ее выполнение зависит от множества составляющих, в числе которых – научно обоснованные технологии уплотнения дорожных оснований. Огромная территория нашей страны, включающая разнообразные по климатическим, геологическим, гидрологическим характеристикам зоны обуславливает дифференцированный выбор методов и методик подготовки дорожной конструкции. Очевидно, что выработать единую технологическую систему строительства автодорог для всех дорожно-климатических зон (ДКЗ) невозможно. Вместе с тем общим для всех регионов является устройство надежных грунтовых оснований, как из завозимых материалов, так и из местных укрепленных грунтов [1-3].

Одним из ключевых факторов, обеспечивающих качество дорожных оснований, является контроль степени уплотнения, в основу которого положены следующие соображения:

- плотность рассматривается как случайная величина, распределенная по нормальному закону;

- требования к среднему значению коэффициента уплотнения устанавливаются в зависимости от однородности уплотнения для достижения нормативных значений с заданной надежностью;

- однородность уплотнения грунта в пределах слоя характеризуется коэффициентом вариации или среднеквадратическим отклонением;

-приемочный контроль качества уплотнения грунта выборочный [4].

Приведенные выкладки не относятся к грунтам естественного залегания, неоднородность которых не подчиняется статистическим законам, вследствие чего при одних и тех же технологических операциях на разных захватках разброс значений плотности может быть значительным. Соответственно, чем больше изменчивость плотности грунта, тем больше требуемое среднее значение коэффициента уплотнения, а качество работ ниже.

Известно, что уплотнение грунта до заданных величин сопровождается внесением определенного количества воды, обеспечивающего пластичность. Однако в большинстве ДКЗ в составе грунтов оснований присутствует супесь, свойства которой кардинально зависят от наличия/отсутствия воды. Согласно ГОСТ 25100 супесь классифицируется по числу пластичности, которое колеблется от 0,01 до 0,07. При этом супесь подвержена морозному пучению, часто размокает, но крайне редко набухает. Из всех глинистых грунтов она размокает быстрее остальных, в связи с крайне малым содержанием глинистых частиц. Уплотнение чистой супеси в большинстве случаев сложный процесс, поскольку изменение ее влажности необратимо влечет разрушению плотных структур. Очевидно, что такие грунты необходимо направленно модифицировать для обеспечения формирования при уплотнении сетчатых структур, обладающих гидрофобным эффектом. В связи с этим актуальным представляется изучение формирования плотных структур супесчаных пылеватых грунтов обработанных органоминеральными добавками. Так, например, добавка органических и (или) органоминеральных соединений увеличивает прочность грунтовых агрегатов за счет склеивания частиц и заполнения порового пространства [5]. Частичная сорбция указанных добавок на поверхности смежных частиц формирует пространственно-сшитые пленки-гели, существенно влияющие на свойства исходного грунта [6].

В последние годы принцип укрепления грунтов получил существенное развитие [7, 8]. Согласно результатам исследования [9], для эффективного укрепления слабых глинистых грунтов целесообразно предварительно стабилизировать их с использованием гранулированного доменного шлака либо природного известняка с размером фракции около 2,5 мм. Оптимальная дозировка этих компонентов составляет 15 мас.% от массы грунта. При таком соотношении достигается прочность на сжатие в диапазоне 2,25–2,45 МПа. Дополнительно исследована комбинированная технология, предусматривающая совместное применение: гранулированного доменного шлака, тонкомолотого доменного шлака (в количестве 10 мас.%), для усиления вяжущих свойств - портландцемента (не более 5 мас.%), для комплексного улучшения эксплуатационных характеристик - сухой комплексной химической добавки «ПРА» (2 мас.%). Такое сочетание компонентов позволяет значительно повысить показатели прочности, плотности и морозостойкости укрепленного грунта. В работе [10] рассматриваются традиционные и нетрадиционные химические стабилизаторы. Упоминаются цемент, известь, летучая зола, шлак гранулированный доменный молотый, геополимеры и другие материалы. Также анализируются факторы, влияющие на процесс стабилизации и укрепления грунтов: пропорция добавки, минералогия глины, тип почвы, pH матрицы почвы, период и температура отверждения, наличие вредных соединений. Авторы [11] предложили методику укрепления супесчаного грунта при строительстве дорожных покрытий в районах с невысокой транспортной нагрузкой с применением фермента Perma-Zyme. В статье [12] рассматривается вопрос использования укрепленных грунтов с добавлением специальных модификаторов, при строительстве автомобильных дорог в I ДКЗ, которая требует особых подходов к проектированию оснований дорожных одежд с обеспечением их высокую несущей способности и устойчивости к морозам. В работе авторы анализируют, как различные добавки влияют на физико-механические характеристики грунтов, оценивают целесообразность их применения с точки зрения долговечности и надежности

дорожных конструкций. Исследования показывают, что выбор метода укрепления (механического, физико-химического или конструктивного) зависит от типа грунта, климатических условий, проектных нагрузок и специфики объекта строительства [13, 14]. Грамотное проектирование и контроль качества работ при укреплении грунтов, включая инженерно-геологические изыскания, расчёт дозировок вяжущих и мониторинг после завершения, обеспечивают долговечность и надёжность оснований, снижая риски деформаций и разрушений [5, 15].

Ранее были исследованы вопросы укрепления глинистых грунтов введением растворов поливинилового спирта (ПВС) в сочетании с цементом или золами-уноса - [16,17]. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности использования ПВС в составе органоминеральных смесей (ОМС). Важнейший результат модификации грунтов ПВС – формирование водостойких плёнок обволакивающих грунтовые агрегаты и обеспечивающих за счёт этого прочность и морозостойкость. Вместе с тем, для обработки супесчаных пылеватых грунтов, в отсутствие цемента, необходимо увеличивать концентрацию ПВС в растворе, что затруднительно при отсутствии его предварительного подогрева. Установлено, что при температуре 25⁰С длительное время стабилен только 7% водный раствор ПВС. Увеличить концентрацию до 12...15% возможно за счёт повышения температуры раствора или введения поверхностно-активных веществ (ПАВ). Предварительными исследованиями установлено, что повышение температуры раствора неэффективно, поскольку при остывании образуется желеобразная масса содержащая отдельные конгломераты, что исключает ее применение в качестве жидкой добавки. Из имеющегося ассортимента ПАВ экспериментально обосновано использование в комплексе с ПВС тринатрийфосфата Na_3PO_4 – базового компонента моющих средств. Реакция поливинилового спирта $[-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{OH})-]_n$ с Na_3PO_4 не является типичной химической реакцией с образованием новых ковалентных связей, это скорее физико-химическое взаимодействие, основанное на ион-полимерной ассоциации. Тринатрийфосфат диссоциирует в водном растворе по схеме: $\text{Na}_3\text{PO}_4 \rightarrow 3\text{Na}^+ + \text{PO}_4^{3-}$. Фосфат ионы PO_4^{3-} могут образовывать ионные связи с гидроксильными группами ПВС. Кроме того, возможен механизм образования водородных связей с фосфат ионами и молекулами воды [18]. Также возможно образование координационных комплексов между PO_4^{3-} и атомами кислорода ПВС.

Возможные следствия указанных реакций:

- увеличение вязкости раствора ПВС из-за образования сетчатой структуры;
- стабилизация коллоидных систем, если ПВС используется как стабилизатор;
- изменение реологии смеси;
- частичная сшивка макромолекул ПВС через фосфат ионы.

Следует отметить, что указанная реакция обратимая. Эффективность реакции зависит от концентрации фосфат ионов, степени гидролиза ПВС (чем больше гидроксильных OH- групп тем сильнее взаимодействие), кислотности pH среды (в кислой среде фосфат ионы могут протонироваться, ослабляя взаимодействие). Анализ научно-практических работ показал перспективность методик укрепления супесчаных пылеватых грунтов комплексными органоминеральными добавками на основе ПВС, что требует проведения дополнительных исследований для отработки разрабатываемых решений в дорожных конструкциях.

В этой связи целью исследования является разработка методики укрепления супесчаных грунтов комплексными органоминеральными добавками на основе растворов поливинилового спирта и тринатрийфосфата, обеспечивающих требуемую степень уплотнения конструктивных слоев дорожных конструкций.

Задачи исследования:

- исследовать изменение вязкости укрепляющей добавки, состоящей из раствора поливинилового спирта и тринатрийфосфата, при различной концентрации компонентов;
- установить влияние количества укрепляющей добавки на водопоглощение и прочность при сжатии укрепленных грунтов.
- провести опытно-промышленную отработку технологии уплотнения супесчаных грунтов с применением разработанной методики укрепления грунтов на основе использования

укрепляющих добавок из ПВС и Na_3PO_4 , на опытных участках автомобильной дороги в Калужской области.

2. Материалы и методы

Исследование вязкости укрепляющей добавки для супесчаных грунтов на основе ПВС+ Na_3PO_4 применен двухфакторный трехуровневый эксперимент. Целевой функции принята вязкость, Па·с, которая определялась на вискозиметре по ГОСТ 18249. Влияющими факторами назначены: концентрация ПВС – 10...14% с шагом 2%, концентрация Na_3PO_4 – 5...9% с шагом 2%. Граница вязкости – 80 Па·с установлена из технологических соображений.

Для оценки влияния количества полученной добавки на прочность при сжатии и водонасыщение образцов из укрепленного супесчаного грунта органоминеральную смесь получали на экспериментальной установке, работающей по принципу пластографа Брабендера [8]. Установка позволяла оценивать технологические свойства органоминеральных смесей по характеру изменения момента вязкого сопротивления под влиянием механического воздействия. Конструктивно установка состояла из смесительной камеры емкостью 500 см³, со сменными роторами различной формы и привода, позволяющего изменять частоту вращения роторов от 1 до 400 об/мин и измерительной системы. Это позволяло определять зависимость крутящего момента на приводном валу от длительности смешения при заданной частоте вращения роторов.

Влияние количества укрепляющей добавки на водопоглощение и прочность при сжатии определяли по ГОСТ 30491 путем испытания образцов цилиндров диаметром 50 мм, высотой 50,1-55,2 мм уплотненных давлением 0,2 МПа, что соответствует давлению, создаваемому пневмошиной самоходного катка.

Опытно-промышленная проверка технологии уплотнения грунтов, укрепленных по разработанной методике на основе применения укрепляющих добавок из ПВС+ Na_3PO_4 , проводилось на опытных участках дорожных конструкций в Калужской области. Устроено 4 опытных участка по 200 метров шириной 3,75 м каждый. На каждом участке использовали свой вариант рецептуры укрепленных грунтов согласно таблице 1. Смесь уплотняли послойно пневмошинными катками по стандартной технологии. Контроль качества уплотнения проводили выборочно по оси захватки и обочинам с интервалом 50 м. Результаты измерений статистически обработаны и сведены в гистограммы распределения величины коэффициента уплотнения.

3. Результаты и обсуждение

В результате эксперимента получены уравнения регрессии, описывающие зависимости изменение вязкости укрепляющей добавки для грунтов на основе ПВС и Na_3PO_4 , по которым возможно установление рационального сочетания компонентов. Установлено, что при концентрации – 12-13% и – 6,6-7% вязкость водного раствора составила 78 Па·с. Раствор указанной вязкости стабилен в течение 40 часов при хранении в затененном месте при температуре не ниже 20⁰С. В результате испытаний также получали зависимость вязкости смеси от длительности смешения. Регистрация измерительной системой неизменной мощности на валу привода свидетельствовала о достижении максимально возможной однородности смеси.

Результаты определения водопоглощения и прочности при сжатии образцов различного состава в возрасте 3-х суток представлены в таблице 1. Различие рецептуры обуславливает влияние вязкости готовой смеси на коэффициент уплотнения основания из укрепленных грунтов.

Таблица 1

Прочность и водопоглощение образцов укрепленных грунтов

№ п/п	Характеристики	Номер и состав ОМС (грунт/добавка), масс.ч			
		1	2	3	4
		300/100	400/110	550/115	600/130
1	Прочность при сжатии, МПа	5,4	5,5	6,3	6,6
2	Водопоглощение, %	5,1	5,2	5,6	5,8
3	Вязкость сдвига, Па·с	190	260	300	350

По полученным результатам установлено, что увеличение концентрации укрепляющей

добавки в исследованном диапазоне достоверно снижает водопоглощение и обеспечивает повышение прочности при сжатии укрепленных грунтов до уровня 6,6 МПа, что показывает целесообразность их применения в дорожном строительстве.

Опытно-промышленную отработку уплотнения грунтов, укрепленных органоминеральными добавками из ПВС и Na_3PO_4 , проведена на опытных участках в Калужской области. Для назначения требований к средней величине коэффициента уплотнения необходимо иметь данные о вариации плотности, т.е. задаться какими-то определенными значениями S или V . Допустимую величину характеристик изменчивости можно определить путем теоретических рассуждений, исходя из требований технических условий к однородности уплотнения.

В соответствии с требованиями нормативных документов минимально допустимое значение коэффициента уплотнения K_{min} для дорог с усовершенствованными капитальными покрытиями должно быть не менее 0,98-1,0. Учитывая возможные отклонения в сторону уменьшения на 0,04, получаем, что в выборке, отобранной из уплотненного слоя, не должно встречаться значений коэффициента уплотнения, меньших 0,94-0,96. За верхний предел возможных значений коэффициента уплотнения можно принять максимальную плотность по виброуплотнению, которая для песчаных грунтов в 1,03-1,04 раза больше максимальной плотности по стандартному уплотнению. Следовательно, максимальная величина коэффициента уплотнения, которая может быть достигнута при уплотнении песчаного грунта, не превысит величину 1,03-1,04. Тогда размах значений коэффициента уплотнения на статистически однородном участке составит $R=0,07-0,10$, а $V=1,1-1,7\%$. Для минимально допустимого значения коэффициента уплотнения $K_{min} = 0,95$, $R=0,12-0,13$, а $V=2,0-2,3\%$.

Полученные значения V в первом приближении можно принять за предельно допустимые по условиям однородности материалов в слоях дорожных конструкций. Известно, что представлена «идеальная» кривая распределения величины коэффициента уплотнения, соответствующая нормальному закону распределения (рис. 1).

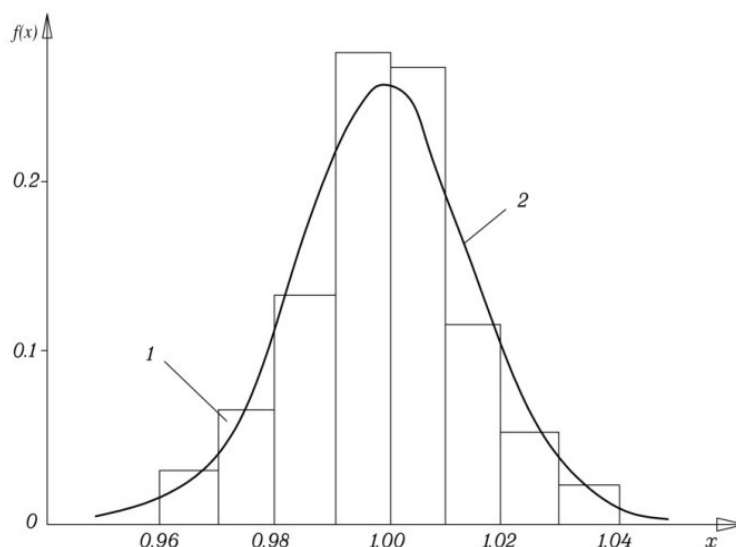


Рис. 1. Распределение величины коэффициента уплотнения грунтовых слоев дорожных конструкций: 1 – гистограмма эмпирического распределения; 2 – теоретическая кривая нормального распределения (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Distribution of the value of the compaction coefficient of the roadbed: 1 – histogram of the empirical distribution; 2 – theoretical curve of the normal distribution (illustration by the authors)

Результаты измерений на опытном участке автомобильной дороги сведены в гистограммы распределения величины коэффициента уплотнения (Рис. 2).

Согласно полученным данным все использованные составы соответствуют требуемым коэффициентам уплотнения. Вместе с тем, наиболее равномерное распределение плотности наблюдалось у состава 2, а наиболее высокий коэффициент уплотнения у состава 4. Полученные данные позволяют скорректировать технологию уплотнения за счет

увеличения/уменьшения массы катка и количества проходов по одному следу. Кроме того, состав укрепленных грунтов возможно корректировать за счет учета естественной влажности супеси. По результатам опытно-промышленной проверки установлено, что разработанная методика укрепления супесчаных грунтов на основе использования укрепляющих добавок из ПВС и Na_3PO_4 обеспечивает достижение требуемых физико-механических свойств и степени уплотнения конструктивных слоев дорожных конструкций.

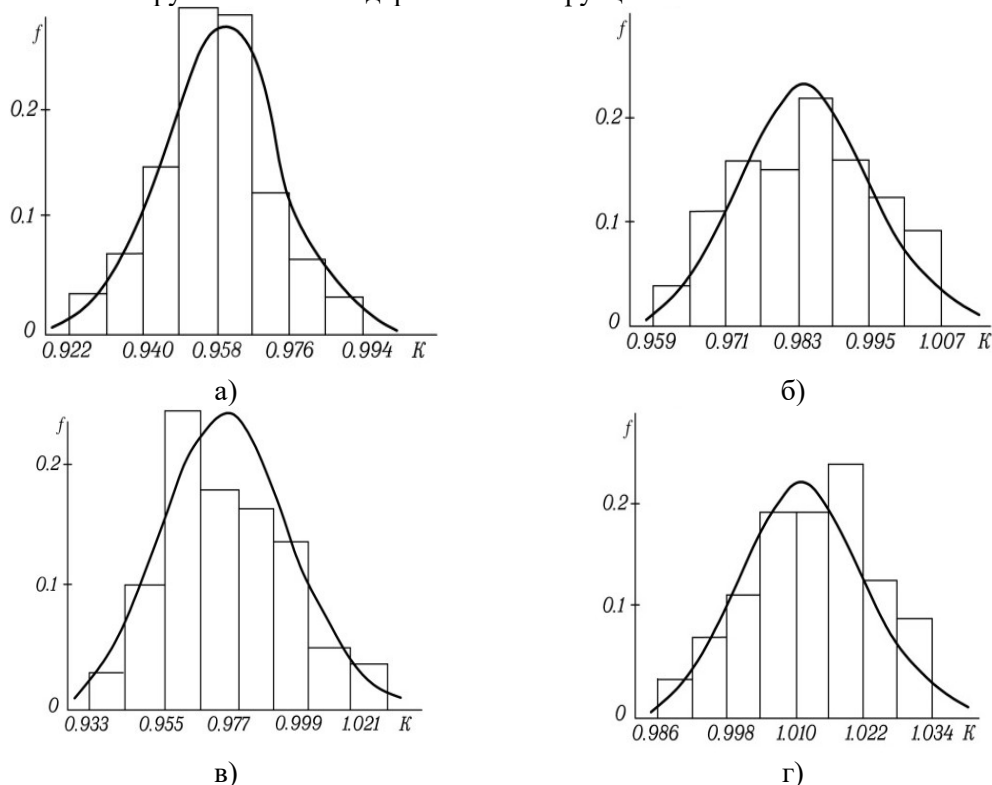


Рис. 1. Гистограммы и теоретические кривые распределения величины коэффициента уплотнения укрепленных грунтов на опытных участках в Калужской области:

а), б), в), г) – составы укрепленных грунтов 1,2,3,4 согласно таблице 1 (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Histograms and theoretical curves of the distribution of the compaction coefficient of the roadbed in the experimental sections of the Kaluga region:

a), b), c), d) – strengthened soils compositions 1,2,3,4 according to Table 1 (illustration by the authors)

Согласно данным [19], обработка супесчаных грунтов 5–10% растворами ПВС повышает их сцепление в 4–6 раз, а после 25 циклов замораживания-оттаивания — до 11 раз. Данный эффект связывается с адгезионными свойствами полимерных цепей, обволакивающих и связывающих частицы грунта. В настоящем исследовании применение комплексной добавки ПВС+ Na_3PO_4 позволило достичь стабильной прочности при сжатии 5,5–6,6 МПа, что подтверждает формирование пространственно-сшитой полимерной сетки, упрочняющей грунтовый скелет.

4. Заключение

1. На основе полученных уравнений регрессии, описывающих зависимости изменение вязкости укрепляющей добавки, установлено рациональное сочетание компонентов и определены составы укрепленных грунтов с добавками на основе раствора поливинилового спирта и тринатрийфосфата. Установлено, что при концентрации ПВС – 12-13% и Na_3PO_4 – 6,6-7% вязкость водного раствора составила 78 Па·с, значение которой стабильно в течение 40 часов при хранении в затененном месте при температуре не ниже 20°C.

2. Установлено, что введение укрепляющей добавки на основе раствора поливинилового спирта и тринатрийфосфата способствует снижению водопоглощения и повышению прочности при сжатии укрепленных грунтов на уровне 5,5-6 МПа, что показывает целесообразность их применения в дорожном строительстве.

3. Проведена опытно-промышленную проверку результатов исследований по применению разработанной методики укрепления супесчаных грунтов органоминеральными добавками, сочетающих в своем составе раствор поливинилового спирта и тринатрийфосфата, на опытных участках в Калужской области. Результаты исследования позволили установить, что использование укрепляющих комплексных добавок в супесчаных грунтах обеспечивает достижение требуемых физико-механических свойств и степени уплотнения конструктивных слоев дорожных конструкций, что может обеспечить повышение их сроков службы и долговечности.

Список литературы/References

1. Руденский А.В. Рациональное использование строительных материалов и ресурсосбережение – актуальные направления повышения эффективности работ при строительстве и ремонте автомобильных дорог // Строительные материалы. 2017. № 3. С. 76–80.
Rudensky A.V. Rational use of building materials and resource conservation – current directions for improving the efficiency of work in the construction and repair of highways // Building Materials. 2017. No. 3. P. 76-80.
2. Renjith R., Robert D., Setunge S., Costa S., Mohejerani A. Optimization of ash based soil stabilization using secondary admixtures for sustainable road construction // Journal of Cleaner Production. 2021. 294 p. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126264.
3. Вдовин Е.А., Строганов В.Ф., Мавлиев Л.Ф. Гидрофобизация цементогрунтов для дорожных одежд: модификация, структура, технология, применение. Казань : Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2023. 202 с. EDN UOYGNNG.
Vdovin E.A., Stroganov V.F., Mavliev L.F. Hydrophobization of cement grunt for road clothes: modification, structure, technology, application. Kazan : Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, 2023. 202 p. EDN UOYGNNG.
4. Стригун К. Ю. Методы экспресс-контроля качества строительства ав-томобильных дорог. Часть первая. Уплотнение грунтов земляного полотна // Молодой ученый. 2016. № 6 (110). С. 200-204
Strigun K. Y. Methods of express quality control of automobile road construction. Part one. Compaction of the soil of the earth bed // Young scientist. 2016. No. 6 (110). pp. 200-204
5. Павликов А.Б., Каменчуков А.В. Эффективность применения добавок для модификации грунтов//Интернет-журнал «Транспортные сооружения» 2024, Том 11, № 3. 2024.
Pavlikov A.B., Kamenchukov A.V. The effectiveness of additives for soil modification//Online magazine "Transport Facilities" 2024, Volume 11, No. 3. 2024.
6. Bulanov P. E., Mavliev L. F., Vdovin E. A., Yagund E. M. The interaction between the kaolinite or bentonite clay and plasticizing surface-active agents // Magazine of Civil Engineering. – 2017. – No. 7(75). – P. 173-181. – DOI 10.18720/MCE.75.17.
7. Кочеткова Р.Г. Современные методы улучшения свойств глинистых грунтов вяжущими и добавками. М. : Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2014. 132 с. EDN SGBPJF.
Kochetkova R.G. Modern methods of improving the properties of clay soils with binders and additives. Moscow : Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 2014. 132 p. EDN SGBPJF.
8. Абу-Хасан М., Соловьева В. Я., Сахарова А. С. Способы стабилизации и укрепления иольдиевых глин и слабых глинистых грунтов при создании земляного полотна в районах Крайнего Севера // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2022. Т. 19. Вып. 3. С. 444-454. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-444-454.
Abu-Hassan M., Solovyova V. Ya., Sakharova A. S. Methods of stabilization and strengthening of yoldium clays and weak clay soils when creating an earth bed in the Far North regions // Izvestiya Peterburgskogo universiteta of Communications. SPb.: PGUPS, 2022. Vol. 19. Issue 3. P. 444-454. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-444-454.

9. Салахов Р.Р. Химические методы стабилизации глинистых грунтов // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2023. № 3. С. 59-64. DOI: 10.15593/24111678/2023.03.06.
Salakhov R.R. Chemical methods of stabilization of clay soils // Transport. Transport facilities. Ecology. 2023. No. 3. P. 59-64. DOI: 10.15593/24111678/2023.03.06.
10. Шилин И.В., Абраимов В.В., Толстиков И.В. Совершенствование технологии устройства покрытия дорог с низкой интенсивностью движения путем стабилизации супесчаного грунта с водной смесью концентрата PERMA-ZYME // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2021. № 2021-4(150). С. 83-90.
Shilin I.V., Abraimov V.V., Tolstikov I.V. Improving the technology of paving roads with low traffic intensity by stabilizing sandy loam with an aqueous mixture of PERMA-ZYME concentrate. // Bulletin of the Donbass National Academy of Construction and Architecture. 2021. No. 2021-4(150). P. 83-90.
11. Каменчуков А.В., Николаева Г.О. Применение укрепленных грунтов в основании дорожных одежд автомобильных дорог, расположенных в I дорожно-климатической зоне // Инженерный вестник Дона. 2024. № 6(114). С. 394-402. EDN VIGQRS.
Kamenchukov A.V., Nikolaeva G.O. The use of reinforced soils at the base of road surfaces of highways located in the I road climate zone // Engineering Bulletin of the Don. 2024. No. 6(114). P. 394-402. EDN VIGQRS.
12. Mohamad H. M., Sharudin M. F. I., Amaludin A. E., Zakaria S. N. F. Characteristic and physicochemical properties of peat soil stabilized with sodium hydroxide (NaOH) // Civil Engineering Journal. 2023. Vol. 9. No. 9. P. 2221-32. DOI: 10.28991/CEJ2023-09-09-09.
13. Vdovin E. A., Bulanov P. E., Stroganov V. F., Morozov V. P. Construction of road pavements using complex modified soil-cement // Construction of Unique Buildings and Structures. 2023. Vol 4. No. 109. P. 10927. DOI: 10.4123/CUBS.109.27.
14. Shepelenko T.S., Gorlenko N.P., Zubkova O.A. Structurization processes of cement composites modified with electrolytic additives // Magazine of Civil Engineering. 2018. Vol. 81. No. 5. P. 125-134. DOI: 10.18720/MCE.81.13.
15. Ali H. E., Asmel N. K., Ganiyu A. A., Tijani, H. Effect of sodium compounds additives on the strength of cement-stabilized soils // Engineering and Applied Science Research. 2020. Vol. 47. No. 3. P. 287–296. DOI: 10.14456/easr.2020.31.
16. Кукина О. Б., Глазков С.С., Барабаш Д.Е. Органоминеральный модификатор укрепленных цементом глинистых грунтов // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2018. – № 1(49). – С. 56-64. – EDN YREWPM
Kukina O. B., Glazkov S.S., Barabash D.E. Organomineral modifier of cement-reinforced clay soils // Scientific Journal of Construction and Architecture. – 2018. – № 1(49). – Pp. 56-64. – EDN YREWPM
17. Барабаш Д.Е., Перова Н.С., Николаева Р.В. Модификация цементогрунтовых систем водорастворимыми полимерами // Известия КГАСУ, 2025, № 3(73), с. 353-363, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/73.30, EDN: ZUMSVV
Barabash D.E., Perova N.S., Nikolaeva R.V. Modification of cement-based systems with water-soluble polymers // News of KSUAE, 2025, No. 3(73), pp. 353-363, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/73.30, EDN: ZUMSVV
18. Сумич А.И., Ещенко Л.С. Влияние добавок на устойчивость насыщенного раствора тринатрийфосфата // Труды БГТУ. Серия III. Химия и технология неорганических веществ. Выпуск XVIII. С. 83-87
Sumich A.I., Yeshchenko L.S. The effect of additives on the stability of a saturated solution of trisodium phosphate // Proceedings of BSTU. Series III. Chemistry and technology of inorganic substances. Issue XVIII. pp. 83-87
19. Стоянович Г. М., Шипарев Р.Г. Закрепление грунтов с помощью криотропного гелеобразования в дорожном строительстве // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2017. – Т. 14, № 4. – С. 759-767. – EDN YMOZQH.

Stoyanovich G. M., Shiparev R.G. Soil fixation using cryotropic gelation in road construction // Proceedings of the St. Petersburg University of Railway Communications. – 2017. – Vol. 14, No. 4. – pp. 759-767. – EDN YMOZQH.

Информация об авторах

Барабаш Дмитрий Евгеньевич, доктор технических наук, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Жуковского и Ю. А. Гагарина», г. Воронеж, Российская Федерация.

E-mail: barabash60170@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-9438-8082.

Перова Надежда Сергеевна, кандидат технических наук, доцент, Военный учебно-научный центр «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Российская Федерация.

E-mail: ktojbk@mail.ru.

Information about the authors

Dmitry E. Barabash, doctor of technical sciences, Military Training and Research Center of the Air Force “Air Force Academy named after Prof. Zhukovsky and Yuri Gagarin”, Voronezh, Russian Federation.

E-mail: barabash60170@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-9438-8082.

Nadezhda S. Perova, candidate of technical sciences, associate professor, Military Training and Research Center of the Air Force “Air Force Academy named after Prof. Zhukovsky and Yuri Gagarin”, Voronezh, Russian Federation.

E-mail: ktojbk@mail.ru.

Дата поступления: 28.01.2026

Дата принятия: 30.04.2026