

УДК: 691.1:004

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.30

EDN: UELPTG



Укрепление грунтов аэродромных площадок с применением кубовых остатков ректификации стирола

Д.Е. Барабаш¹, Н.С. Перова¹

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

Аннотация. *Постановка задачи.* Удалённость районов Дальнего Востока и Забайкалья от дорожной сети создаёт проблему обеспечения ежедневного транспортного сообщения. В этой связи данные районы, наряду с водным транспортом, интенсивно используют легкомоторную авиацию и транспортные вертолеты. В связи с необходимостью организации авиасообщения требуется создание минимально оборудованных посадочных площадок для легкомоторных самолётов и вертолёт. Поскольку данная авиационная техника, несмотря на скромные габариты, обладает значительным весом, площадки обязаны быть оснащены искусственным покрытием, способным выдерживать возникающие высокие колёсные нагрузки. Для строительства посадочных площадок необходимо предусмотреть возможность использования промышленных отходов регионов для улучшения свойств строительных материалов. Цель исследования: обоснование использования кубовых остатков ректификации стирола (КОРС) нефтехимических предприятий Дальнего Востока и Забайкалья при укреплении бентонитовых глин битумными эмульсиями для устройства покрытий аэродромных площадок санитарной авиации.

Задачи исследования: установить влияние добавок КОРС на изменение вязкости битумной эмульсии при разных температурах; оценить влияние количественно-качественного состава укрепляющего вяжущего на показатели морозостойкости и прочности при сжатии образцов укрепленных грунтов; определить технологические особенности устройства покрытий аэродромных площадок из грунтов, укрепленных битумной эмульсией с добавками КОРС, для климатических условий Забайкалья и Амурской области.

Результаты. Рассмотрена перспективная возможность строительства в Забайкалье и Амурской области аэродромных площадок из грунтовых покрытий, укрепленных битумной эмульсией, которую получают добавлением КОРС в битум БНД 40/60. Установлено, что при укреплении грунта битумной эмульсией с добавлением КОРС обеспечивается повышение прочности при сжатии и коэффициента морозостойкости. Определены технологические особенности устройства конструкций двухслойных покрытий аэродромных площадок для санитарной авиации Забайкалья и Амурской области из укрепленных грунтов с использованием КОРС.

Выводы. Значимость полученных результатов для дорожного строительства заключается в подтверждении возможности применения использования кубовых остатков ректификации стирола нефтехимических предприятий Дальнего Востока и Забайкалья при укреплении бентонитовых глин битумными эмульсиями для устройства покрытий аэродромных площадок. Это обеспечивает транспортное сообщение с отдаленными территориями Российской Федерации.

Ключевые слова: покрытие, грунты, посадочная площадка, кубовые остатки ректификации стирола, асфальтобетонный гранулят, эмульсия.

Для цитирования: Барабаш Д.Е., Перова Н.С. Укрепление грунтов аэродромных площадок кубовыми остатками ректификации стирола // Известия КГАСУ, 2026, № 1 (75), с. 367-375, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.30, EDN: UELPTG

Strengthening the soils of airfield sites using styrene distillation residues

D.E. Barabash¹, N.S. Perova¹

¹Military Training and Research Center of the Air Force “Air Force Academy named after Prof. Zhukovsky and Yuri Gagarin”, Voronezh, Russian Federation

Abstract. Problem statement. The remoteness of the regions of the Far East and Transbaikalia from the road network creates a problem of providing daily transport links. In this regard, these areas, along with water transport, intensively use light-engine aircraft and transport helicopters. Due to the need to organize air traffic, it is necessary to create minimally equipped landing sites for light-engine aircraft and helicopters. Since this aircraft, despite its modest dimensions, has a significant weight, the sites must be equipped with artificial surface capable of withstanding the high wheel loads that occur. For the construction of landing sites, it is necessary to provide for the possibility of using industrial waste from the regions to improve the properties of building materials. The purpose of the study is to substantiate the use of styrene distillation residues from petrochemical enterprises in the Far East and Transbaikalia when strengthening bentonite clays with bitumen emulsions for the construction of airfield pavements for sanitary aviation.

The research tasks are to establish the effect of styrene distillation residue additives on changes in the viscosity of bitumen emulsions at different temperatures; to evaluate the influence of the quantitative and qualitative composition of the strengthening binder on the frost resistance and compressive strength of reinforced soil samples; and to determine the technological features of constructing airfield pavements from soils reinforced with bitumen emulsions containing styrene distillation residue additives for the climatic conditions of the Transbaikal and Amur regions.

Results. The study considers a prospective possibility of constructing airfield sites in the Transbaikal and Amur regions from soil surfaces reinforced with bitumen emulsion, which is obtained by adding styrene distillation residues to BND 40/60 bitumen. It was established that strengthening the soil with bitumen emulsion with the addition of styrene distillation residues results in an increase in compressive strength and frost resistance coefficient. Technological features of the construction of two-layer pavements for airfield sites for sanitary aviation in the Transbaikal and Amur regions from reinforced soils using styrene distillation residues were determined.

Conclusions. The significance of the results obtained for road construction is to confirm the possibility of using styrene distillation residues from petrochemical enterprises in the Far East and Transbaikalia when strengthening bentonite clays with bitumen emulsions for the construction of airfield pavements. This will ensure transport links to remote territories of the Russian Federation.

Keywords: surface, soils, landing pad, styrene distillation residues, asphalt-concrete granulate, emulsion.

For citation: Barabash D.E., Perova N.S. Strengthening the soils of airfield sites using styrene distillation residues // News of KSUAE, 2026, № 1 (75), p. 367-375, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.30, EDN: UELPTG

1. Введение

Рост экономики российских регионов неразрывно связан с развитием транспортной инфраструктуры. Известно, что транспортная доступность отдельных регионов России значительно отличается. Так по состоянию на начало 2025 года в Центральном Черноземье плотность дорожной сети с устойчивым покрытием составляла (на 1000 квадратных километров территории): Белгородская область - 697,6 км дорог; Липецкая область - 572,4 км дорог; Воронежская область - 439,6 км дорог; Курская область - 378,2 км дорог; Тамбовская область - 297,5 км дорог. В то же время Амурская область имеет всего 37 км дорог на 1000 квадратных километров территории, а некоторые районы Забайкалья и того

менее - 34,6 км [1]. Такие различия требуют реализации различных подходов к развитию транспортной инфраструктуры.

Строительство новых автомобильных дорог требует значительных инвестиций и весьма продолжительно по времени, а транспортная связь с отдаленными регионами требуется постоянно. В этой связи районы Дальнего Востока и Забайкалья, наряду с водным транспортом, интенсивно используют легкомоторную авиацию и транспортные вертолеты. Как правило, малые населенные пункты указанных регионов расположены вблизи крупных рек, что обусловлено традиционным их использованием для коммуникации во время навигации. Однако в ряде случаев водный транспорт не в состоянии обеспечить потребности населения этих поселков. В связи с этим возникает необходимость устройства минимально оборудованных посадочных площадок для легкомоторной авиации и вертолетов. Несмотря на скромные габариты указанная авиационная техника обладает значительным весом, что обуславливает высокие значения колесных нагрузок, обуславливающих потребность в искусственных покрытиях указанных площадок. Кроме того, эти площадки должны обеспечивать круглогодичную эксплуатационную готовность, независимо от климатических условий.

Устройство посадочных площадок для легкомоторной авиации и вертолетов связано с рядом ограничений. Ограничения следуют из условий производства работ и отдаленности мест устройства площадок от производственной базы строительства и сырьевых материалов [2, 3].

Первое ограничение – грунты естественного залегания прибрежных участков рек Амурской области и Забайкалья представлены низко прочными бентонитовыми глинами, склонными к сезонному набуханию [1]. Основной компонент бентонитовых глин - монтмориллонит до 60...80%. В бассейне реки Зея (населенные пункты Овсянка, Березовка) преобладает щелочной тип монтмориллонита, с содержанием оксида алюминия до 20%, кремнезема - до 55%, дополнительно присутствует каолинит и галлузит. Отличительной особенностью бентонитовых глин является обратимое увеличение объема при набухании в воде на 10...200%, с последующим высыханием [4, 5]. Благодаря этому при нагрузке на грунтовую площадку наблюдается пучение, вызывающее деформацию покрытия. Малая устойчивость бентонитовых глин при циклических условиях работы типа «набухание – высыхание» и «набухание – высыхание с промежуточным промерзанием» при рабочей температуре от минус 40 до плюс 30°C, приводит к необратимым изменениям формы [6]. Кроме того, свойства указанных грунтов нестабильны даже в условиях строительной площадки, что существенно усложняет разработку рациональных рецептур укрепленных смесей. Очевидно, что указанные грунты необходимо укреплять и гидрофобизировать [7, 8].

Второе ограничение – строительные работы необходимо закончить за один сезон, продолжительность которого не более 4 месяцев. При этом непосредственное укрепление и обработку грунтов возможно начинать только после снижения их влажности до 30% [3].

Третье ограничение – все строительные материалы и техника завозные. Завоз исключительно водным транспортом в период навигации. Объем завоза должен согласовываться с условиями размещения техники и складских площадок. Кроме того, необходимы дополнительные работы по обеспечению разгрузки судов с техникой и материалами [9, 10]. Указанные ограничения существенно сужают перечень используемых материалов и технологий работ.

В области укрепления глинистых грунтов опубликовано значительное количество работ, причем их авторы рассматривали весьма обширный перечень материалов для укрепления и гидрофобизации грунтов [11, 12]. Вместе с тем, общим в этих исследованиях являлось соблюдение требований прочности при сжатии и морозостойкости, при этом количество компонентов укрепляемой грунтовой смеси должно быть минимальным, а сами реагенты - доступными и сравнительно недорогими [13, 14].

Перспективным направлением, позволяющим утилизировать промышленные отходы и улучшить свойства строительных материалов, это использование КОРС в грунтовых смесях совместно с асфальтобетонным гранулятом (ГА) и битумом дорожным. Однако опыт применения таких композиций ограничен, и требуется дальнейшая

разработка технологий с учётом токсичности КОРС и необходимости модификации его состава.

КОРС – это побочный продукт производства стирола при его выделении в ректификационных колоннах [15]. Даже при использовании ингибиторов полимеризации выход составляет 16-23 кг на тонну стирола или около 20 т на 1000 т целевого продукта. Выпускается в соответствии с ТУ 2414-127-05766575-2025. За Уралом основные производители – ОАО «Ангарскнефтесинтез», ОАО «Нижекамскнефтехим». Являясь смесью ароматических углеводородов, КОРС обладает хорошей растворяющей способностью по отношению к полимерам, при этом его состав крайне нестабилен. Только 53% всей массы кубовых остатков содержат стирола более 20% [7].

Покрытия на основе сополимеров КОРС образуют прозрачные пленки от светло-коричневого до коричневого цвета. В дорожном строительстве улучшает адгезию к гравию и сцепление с грунтом. Следует отметить, что вопросам использования КОРС в дорожной отрасли посвящено незначительное количество работ [16, 17]. Большинство из них рассматривают КОРС исключительно как эффективный разбавитель битума в составе асфальтобетонных смесей. В то же время КОРС весьма эффективен как пленкообразователь, причем свойства этих пленок обеспечивают повышение морозостойкости аэродромных покрытий на 30...40%.

Кроме того, распоряжением Правительства РФ №2094-р от 2023 установлена классификация продукции с использованием вторичного сырья, что утвердило курс государства на поддержку применения вторичного сырья. Документ вступил в силу с марта 2024 года. В связи с этим использование КОРС в составе укрепленного грунта вполне актуально.

Цель исследования: обоснование использования КОРС нефтехимических предприятий Дальнего Востока и Забайкалья при укреплении бентонитовых глин битумными эмульсиями для устройства покрытий аэродромных площадок санитарной авиации. Для достижения цели были сформулированы следующие задачи:

- установить влияние добавок КОРС на изменение вязкости битумной эмульсии при разных температурах;
- оценить влияние количественно-качественного состава укрепляющего вяжущего (с вариацией содержания КОРС, ГА и битума) на показатели морозостойкости и прочности при сжатии образцов укрепленных грунтов.
- определить технологические особенности устройства покрытий аэродромных площадок из грунтов, укрепленных битумной эмульсией с добавками КОРС, для климатических условий Забайкалья и Амурской области.

2. Материалы и методы

Пробы грунтов для исследования отобраны вблизи поселков Овсянка и Березовка, расположенных в долине реки Зея Амурской области России, где предполагается разместить площадки санитарной авиации.

В рамках представленного исследования рассматривается применение бентонитовых глин, укрепленных битумной эмульсией (БЭ), которую получают из битума БНД 40/60 с добавлением КОРС. Указанные компоненты были выбраны из соображений их доступности и специфического взаимодействия с набухающими бентонитовыми глинами. Битумное вяжущее производства Рязанского нефтеперерабатывающего завода по показателям, регламентированным методикой Маршалла, в целом соответствует требованиям системы Supergravel. В силу того, что традиционно проектирование смесей базируется на свойствах битума конкретного завода поставщика, установить закономерности формирования структуры битумов разных производителей практически невозможно [18-20].

В силу того, что исходный грунт мелкодисперсный материал, а применяемый гранулят соответствует фракции 5-10 мм, для получения однородной смеси использовался принудительный смеситель лопастного типа с регулируемым количеством оборотов. Первичное перемешивание компонентов исходной влажности осуществляли на малых скоростях вращения лопастей. При последующем порционном введении грунта в БЭ

скорость вращения увеличивали. Далее в полученную органоминеральную смесь (ОМС) добавляли ГА и перемешивали до получения однородной массы. Готовность смеси к уплотнению оценивали по начинающемуся ее отслоению от стенок мешалки. Далее полученную смесь прессовали в формах цилиндрах давлением 0,2 МПа и выдерживали в нормальных температурно-влажностных условиях. Испытания образцов проводили в возрасте 3 и 7 суток.

Исследование включает:

– определение изменения динамической вязкости исходного битума по ГОСТ 33137 на ротационном вискозиметре при добавке КОРС с дозировкой 20, 30, 40%. Затем полученную БЭ подогревали до температуры 50⁰С и определяли динамическую вязкость. Указанная характеристика необходима для установления технологии смешивания грунта с БЭ.

– определение влияния количественно-качественного состава укрепляющей добавки на морозостойкость и прочность при сжатии. Определение показателей физико-механических свойств укрепленных грунтов выполнялось в соответствии с ГОСТ Р 70453. Испытаниям подвергались образцы цилиндры укрепленных грунтов диаметром 50 мм, высотой 50,1-55,2 мм, уплотненные давлением 0,2 МПа, что соответствует давлению, создаваемому колесом самоходного катка. Прочность при сжатии определяли на сухих и водонасыщенных в течение 3 суток образцах. Коэффициент морозостойкости определяли, как отношение прочности образца после испытания на многократное замораживание и оттаивание к прочности образца до испытания. Коэффициент морозостойкости находили после проведения 15 циклов замораживания-оттаивания.

3. Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований получены уравнения изменения вязкости η битумной эмульсии с КОРС от температуры T для трех вариантов процентного содержания КОРС, Па·с: при 20% КОРС $\eta=228,57 e^{-0,0697T}$; при 30% КОРС $\eta=375 e^{-0,0644T}$; при 40% КОРС $\eta=48e^{-0,0555T}$. Установлено, что наиболее технологичными являются БЭ с вязкостью от 10 до 20 Па·с. Указанная вязкость достигается либо за счет увеличения концентрации КОРС до 35...40%, либо за счет ее подогрева. Максимальное количество вводимого ГА ограничено конечной вязкостью органоминеральной смеси (ОМС) 80 Па·с. При более высокой вязкости введение ГА практически невозможно.

Результаты испытаний укрепленных грунтов представлены в таблицах 1 - 2 и на рисунках 1 - 2.

Таблица 1

Значения характеристик образцов укрепленного грунта

Количество БЭ / количество грунта, масс.ч.	Характеристики образцов*			
	в возрасте 3 суток		в возрасте 7 суток	
	$R^3_{сж}$, МПа	$K^3_{мор}$	$R^7_{сж}$, МПа	$K^7_{мор}$
20/350 (ОМС1)	3,4 / 3,1	0,33	4,8 / 4,6	0,43
30/680 (ОМС2)	3,1 / 2,7	0,34	4,6 / 4,4	0,47
40/860 (ОМС3)	3,2 / 2,8	0,35	4,9 / 4,5	0,58

* Над чертой значения прочности для сухих образцов, за чертой - для водонасыщенных

Таблица 2

Значения характеристик образцов укрепленного грунта с гранулятом асфальтобетона

Количество ГА/количество ОМС, масс.ч	Характеристики образцов**			
	в возрасте 3 суток		в возрасте 7 суток	
	$R^3_{сж}$, МПа	$K^3_{мор}$	$R^7_{сж}$, МПа	$K^7_{мор}$
220/420 (ОМС1)	5,2 / 4,5	0,25	6,1 / 5,8	0,31
230/430 (ОМС2)	5,8 / 4,9	0,34	6,6 / 6,2	0,47
240/460 (ОМС3)	6,2 / 5,8	0,43	7,1 / 6,7	0,68

**Над чертой значения прочности для сухих образцов, за чертой - для водонасыщенных

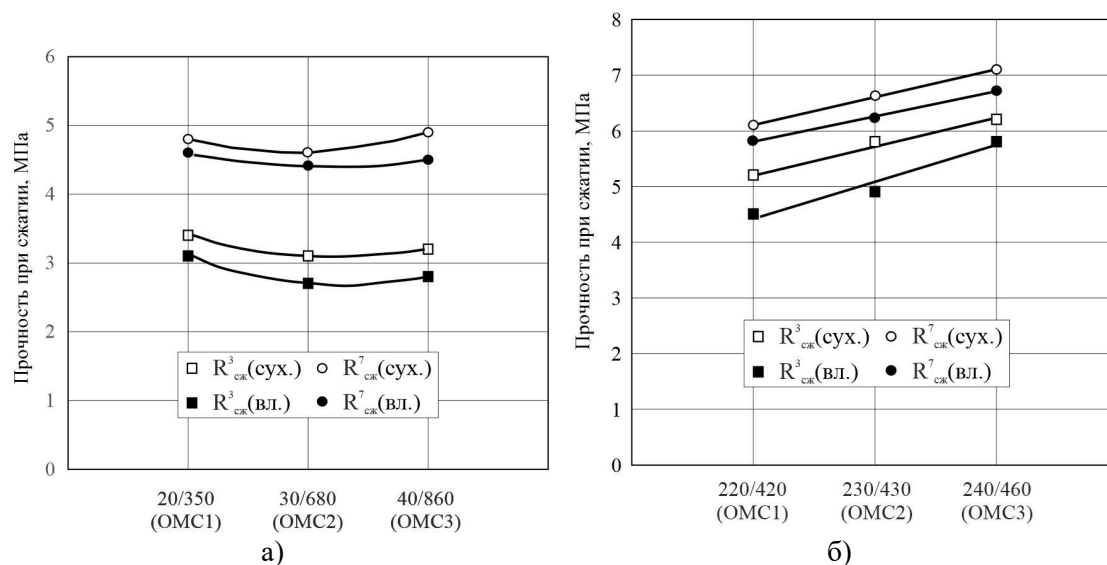


Рис. 1. Прочность при сжатии грунтов, укрепленных битумом БНД 40/60 с добавлением КОРС: а) без гранулята асфальтобетона в составе; б) с гранулятом асфальтобетона в составе (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Compressive strength of soils reinforced with BND 40/60 bitumen with the addition of styrene distillation residues: a) without asphalt concrete granules in the composition; b) with asphalt concrete granules in the composition (illustration by the authors)

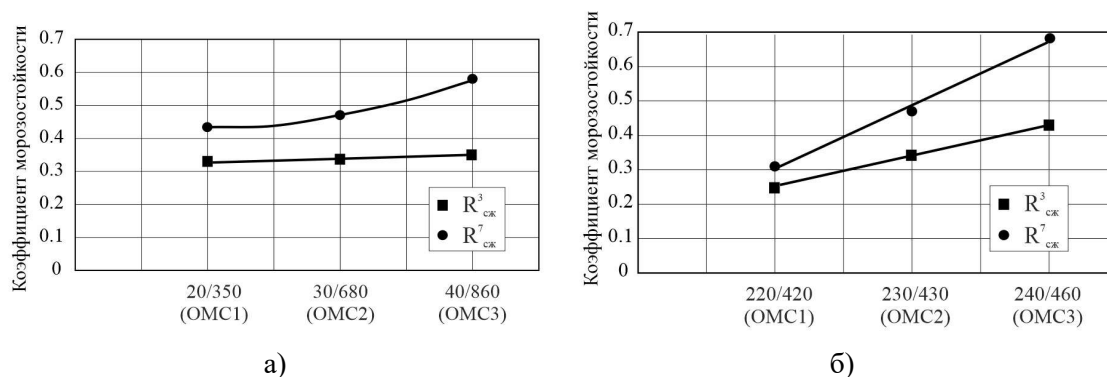


Рис. 2. Коэффициент морозостойкости грунтов, укрепленных битумом БНД 40/60 с добавлением КОРС: а) без гранулята асфальтобетона в составе; б) с гранулятом асфальтобетона в составе (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Coefficient of frost resistance of soils reinforced with BND 40/60 bitumen with the addition of styrene distillation residues: a) without asphalt concrete granules in the composition; b) with asphalt concrete granules in the composition (illustration by the authors)

По результатам испытаний образцов различного состава установлено, что введение КОРС в сочетании с битумом БНД 40/60 в исследуемом диапазоне достоверно обеспечивает прирост прочности при снижении уровня водопоглощения. С увеличением концентрации гранулята асфальтобетона прочность при сжатии образцов ожидаемо растёт, а энергозатраты на принудительное смешивание увеличиваются. При этом с увеличением концентрации КОРС в смеси проявляется пластифицирующий эффект, о чем свидетельствует снижение мощности на валу привода мешалки.

Введение КОРС для разжижения битума БНД 40/60 обеспечивает равномерное распределение пленкообразующего по объему смеси, что повысило плотность и морозостойкость образцов. Об этом свидетельствует рост коэффициента морозостойкости для всех концентраций КОРС в растворе.

В климатических условиях Забайкалья и Амурской области наиболее рационально устройство двухслойного покрытия аэродромных площадок санитарной авиации:

- нижний слой представляет собой грунт, укрепленный эмульсией из битума БНД 40/60 с КОРС (ОМС);

- верхний слой – ОМС с добавлением гранулята асфальтобетона.

Грунты, укрепленные битумной эмульсией с использованием КОРС, рекомендуется приготавливать в мобильных грунтосмесительных установках выбранного объема в соответствии с возможностями доставки на объект. Укладка слоя из укрепленных грунтов возможно производить асфальтоукладчиками по заданным вертикальным отметкам. Укладка ОМС производится одним слоем. Главным фактором получения слоя основания постоянной толщины является поддержание стабильного давления материала на выглаживающую плиту. Масса материала, поданного к выглаживающей плите, должна заполнять шнековую камеру до оси вала шнека. Уплотнение уложенного слоя ОМС следует начинать после распределения ее на участке не менее 20-30 м.

Для обеспечения требуемых показателей плотности, ровности и поперечных уклонов, уложенный слой ОМС следует начинать уплотнять со стороны обочины. Верхний слой с добавлением ГА укладывается и уплотняется аналогично. Все слои подлежат предварительной укатке с контролем достигаемой плотности.

Полученные результаты укрепления бентонитовых глин с использованием КОРС согласуются с современными тенденциями применения промышленных отходов в дорожном строительстве. Концепция использования побочных продуктов промышленности для укрепления грунтов находит подтверждение в исследовании авторов [19], где было установлено, что применение эмульсий на основе пиролизных масел из отходов позволяет добиться прироста предела прочности при сжатии глинистых грунтов до 80.7% на 7-е сутки и до 119.1% на 28-е сутки. Это подтверждает высокую эффективность органо-минеральных модификаторов на основе промышленных отходов для укрепления проблемных глинистых грунтов.

4. Заключение

- Определена перспективная возможность устройства покрытий аэродромных площадок в Забайкалье и Амурской области Российской Федерации из грунтов, укрепленных битумной эмульсией на основе битума БНД 40/60 с добавлением кубовых остатков ректификации стирола.

- Установлено влияние добавок кубовых остатков ректификации стирола на изменение вязкости битумной эмульсии при разных температурах, а также определено наиболее рациональное значение вязкости (от 10 до 20 Па·с) исходя из решения технологических задач. Получены уравнения изменения вязкости битумных эмульсий с разными концентрациями КОРС от температуры. Обеспечение заданной вязкости возможно за счет увеличения концентрации добавок кубовых остатков ректификации стирола до 35-40%, либо за счет ее подогрева.

- Введение КОРС в битум БНД 40/60 в исследуемом диапазоне достоверно обеспечивает прирост прочности и морозостойкости укрепленных грунтов. С увеличением концентрации гранулята асфальтобетона в составе укрепленных грунтов обеспечивает повышение прочности при сжатии и коэффициентов морозостойкости при одновременном увеличении энергозатрат на принудительное перемешивание смесей. Увеличение концентрации кубовых остатков ректификации стирола в смесях, обуславливает пластифицирующий эффект и снижение мощности на валу привода мешалки.

- Для климатических условий Забайкалья и Амурской области Российской Федерации определена рациональная конструкция двухслойного покрытия аэродромных площадок из грунтов, укрепленных битумной эмульсией с добавками кубовых остатков ректификации стирола, а также технологические особенности устройства покрытий с применением мобильных грунтосмесительных установок и стандартной дорожно-строительной техники.

Список литературы / References

1. Паспорт региона Российской Федерации. Забайкальский край. URL: https://rlw.gov.ru/storage/document/document_file/2025-05/27/pasport-zabajkal-skij-kraj.-1.pdf.

- Passport of the region of the Russian Federation. Transbaikal Territory. URL: https://rlw.gov.ru/storage/document/document_file/2025-05/27/pasport-zabajkal-skij-kraj.-1.pdf.
2. Вдовин Е.А., Строганов В.Ф., Мавлиев Л.Ф. Пути повышения эффективности укрепления грунтов для строительства дорожных одежд // Вестник СибАДИ. 2013. № 1 (29). С. 52-58.
Vdovin E.A., Stroganov V.F., Mavliev L.F. Ways to increase the effectiveness of soil reinforcement for the construction of pavement structural layers// Bulletin of SibADI. 2013. No. 1 (29). P. 52-58.
 3. Monil V., Kruti J. Analysis of durability and strength of cement treated soils for subbase and base layers of pavement // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology. 2022. Vol. 10. P. 156-169. <https://doi.org/10.22214/ijraet/2022/47831>.
 4. Тюменцева О.В. Исследование влияния минералогического состава грунтов при комплексном их укреплении цементом и другими веществами в условиях Западной Сибири // Тр. СоюзДорНИИ. 1968. № 29. С. 42-47.
Tyumentseva O.V. Investigation of the influence of the mineralogical composition of soils during their complex reinforcement with cement and other substances in the conditions of Western Siberia // Tr. SoyuzDorNII, 1968, No. 29. P. 42-47.
 5. Слободчикова Н.А., Лофлер М. Методики подбора составов грунтов, укрепленных известью, для дорожного строительства // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2018. Т. 8. № 2. С. 141–147.
Slobodchikova N.A., Lofler M. Methods of selecting lime-reinforced soil compositions for road construction // News of universities. Investment. Construction. Realty. 2018. Vol. 8. No. 2. P. 141-147.
 6. Tanyıldızı M., Uz V. E., Gökalp İ. Utilization of waste materials in the stabilization of expansive pavement subgrade: An extensive review // Construction and Building Materials. 2023. 398 p. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132435.
 7. Вдовин Е.А., Коновалов Н.В., Применение комплексной модификации в технологии укрепления грунтов // Известия КГАСУ. 2024. № 3(69). С. 46-57. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/69.5. EDN: FPWJIL.
Vdovin E.A., Konovalov N.V. Application of complex modification in soil stabilization technology// News of KSUAE. 2024. No. 3(69). P. 46-57. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/69.5, EDN: FPWJIL.
 8. Shifa B., Ahmed S.M. Sustainable strength improvement of clay soil via steel slag and hydrothermal solidification: A geochemical approach using the role of chemical compositions, Ruxton Ratio, and cementation index // Sustainable Chemistry and Pharmacy. 2025. Vol. 45. P. 102024. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2025.102024>.
 9. Вдовин Е.А., Буланов П.Е., Мавлиев Л.Ф., Баранов В.А., Хайбуллин И.И. Влияние поликарбоксилатного пластификатора на физико-механические характеристики цементогрунта // Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура. 2023. № 1 (1). С. 4-8. EDN: HHSIKQ.
Vdovin E.A., Bulanov P.E., Mavliev L.F., Baranov V.A., Khaibullin I.I. The influence of polycarboxylate plasticizer on the physical and mechanical characteristics of soil cement // Roads and transport infrastructure. 2023. No. 1 (1). P. 4-8. EDN: HHSIKQ.
 10. Ключев С.В., Слободчикова Н.А., Плюта К.В., Ключев А.В. Применение техногенных отходов при укреплении грунтов автомобильных дорог // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 775–786. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-775-786.
Klyuyev S.V., Slobodchikova N.A., Pluta K.V., Klyuyev A.V. The use of man-made waste in strengthening the soils of highways // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, Iss. 4. P. 775–786. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-775-786.
 11. Lees A.S., Han J. A mobilised bearing capacity approach to the performance-based design of unpaved roads // Transportation Geotechnics. 2024. Vol. 44. P. 101177. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101177>.

12. Барабаш Д.Е., Кукина О.Б., Глазков С.С. Органоминеральный модификатор укрепленных цементом глинистых грунтов // Научный журнал строительства и архитектуры. ВГТУ. Воронеж. 2018. №1(49). С. 56-64.
Barabash D.E., Kukina O.B., Glazkov S.S. Organomineral modifier of cement-reinforced clay soils // Scientific Journal of Construction and Architecture. VGTU. Voronezh. 2018. No. 1(49). P. 56-64.
13. Yuning W., Xiangxin H., Qiang P., Xiujun C., Pengfei Q., Zhicheng X. Improvement of mechanical behavior of cemented soil reinforced with waste sisal fibers: An optimal selection and modification research // Case Studies in Construction Materials. 2024. Vol. 21. P. 03515. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03515>.
14. Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р. К развитию и расширению глинобитного строительства // Academia. Архитектура и строительство. 2021. № 1. С. 170-175. DOI 10.22337/2077-9038-2021-1-170-175. EDN HEYYWC.
Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R. Towards the development and expansion of adobe construction // Academia. Architecture and construction. 2021. No. 1. P. 170-175. DOI 10.22337/2077-9038-2021-1-170-175. EDN HEYYWC
15. Филимонова О.Н. Переработка и применение кубовых остатков ректификации стирола // Успехи современного естествознания. 2010. №2. С. 115-117.
Filimonova O.N. Processing and application of styrene distillation residues // Successes of modern natural science. 2010. No. 2. P. 115-117.
16. Prowell B., Brown E.R. Superpave mix design: Verifying gyrations levels in the N(design) table, NCHRP 573. National academy of science, 2007. 223 p.
17. Горелышева, Л.А. Теоретические аспекты систематизации добавок, улучшающих свойства битумного вяжущего и асфальтобетонной смеси // Дороги и мосты. 2019. №. 2. С. 203–236.
Gorelysheva, L.A. Theoretical aspects of the systematization of additives that improve the properties of bitumen binders and asphalt concrete mixtures // Roads and bridges. 2019. No. 2. P. 203-236.
18. Huang K., Tang H., Cai G., Ma D., Huang K., Liu L., Wang F. Research on the dynamic fracture characteristics and constitutive model of cement-metakaolin stabilized soil under freeze-thaw cycle conditions // Construction and Building Materials. 2025. Vol. 481. P. 141641. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141641>.
19. Waciński W et al. Recycling of Industrial Waste as Soil Binding Additives-Effects on Soil Mechanical and Hydraulic Properties during Its Stabilisation before Road Construction. Materials (Basel). 2024 Apr 25;17(9):2000. doi: 10.3390/ma17092000.

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 учебнонаучный 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: 11.01.2026

Дата принятия: 30.04.2026