

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.59>**АСФАЛЬТОБЕТОН С АКТИВИРОВАННЫМ МИНЕРАЛЬНЫМ ПОРОШКОМ ИЗ ЗОЛОШЛАКА НА ПОЛИМЕРНО-БИТУМНОМ ВЯЖУЩЕМ**

Научная статья

Цупикова Л.С.^{1,*}¹Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (llsts[at]mail.ru)

Аннотация

В статье рассматривается влияние полимерно-битумного вяжущего в сочетании с гидрофобизированным минеральным порошком из отходов промышленного производства на свойства асфальтобетона. Золошлаковая смесь подвергается сушке и активации в газовой среде, полученной при сжигании топлива и применяется в качестве минерального порошка для асфальтобетона. Это повышает адгезию и снижает водонасыщение. Для улучшения низкотемпературных свойств асфальтобетона и повышения его трещиностойкости при пониженных температурах совместно с золошлаком предлагается использовать полимерно-битумное вяжущее. В статье рассмотрены физико-механические свойства асфальтобетона, повышенное внимание уделено его водостойкости, которая является основным показателем, характеризующим атмосферостойкость и долговечность композиционного материала в условиях влажного дальневосточного климата. Сделан краткий обзор литературы, приведены и проанализированы результаты испытаний асфальтобетона.

Ключевые слова: асфальтобетон, активация, полимерно-битумное вяжущее, зола уноса ТЭС, водостойкость.

ASPHALT CONCRETE WITH ACTIVATED MINERAL POWDER FROM ASH SLAG ON POLYMER-BITUMEN BINDER

Research article

Tsupikova L.S.^{1,*}¹ Pacific State University, Khabarovsk, Russian Federation

* Corresponding author (llsts[at]mail.ru)

Abstract

The article examines the influence of polymer-bitumen binder in combination with hydrophobic mineral powder from industrial waste on the properties of asphalt concrete. The ash slag mixture is dried and activated in a gas environment obtained from fuel combustion and is used as a mineral powder for asphalt concrete. This increases adhesion and reduces water saturation. To improve the low-temperature properties of asphalt concrete and increase its crack resistance at low temperatures, it is suggested to use a polymer-bitumen binder together with ash slag. The paper reviews the physical and mechanical properties of asphalt concrete, with a focus on its water resistance, which is the main indicator characterising the weather resistance and durability of the composite material in the humid Far Eastern climate. A summary of the literature is provided, and the results of asphalt concrete tests are presented and analysed.

Keywords: asphalt concrete, activation, polymer-bitumen binder, ash slag from TPP, water resistance.

Введение

Преждевременное разрушение структуры асфальтобетона происходит из-за длительного или периодически повторяющегося увлажнения и циклов попеременного замораживания и оттаивания. Разрушение происходит по причине низкой деформативности асфальтобетона при отрицательных температурах и недостаточной адгезии битума к минеральным материалам. В этой работе предпринята попытка улучшить адгезию и деформативные свойства асфальтобетона. Для приготовления асфальтобетона не всегда применяются минеральные порошки из карбонатных пород. Для дорог невысоких категорий допускается применять минеральный порошок МП-3 в соответствии с ГОСТ 32761-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Минеральный порошок. Технические требования». К порошкам МП-3 относятся, кроме прочих, порошки из твердых и порошкообразных отходов промышленного производства. В статье рассматривается применение порошка из зол уноса теплоэлектростанций (ТЭС). Такие порошки давно рассматриваются и применяются в качестве минерального порошка для асфальтобетона, что отражено и в нормативной базе, но адгезия битума к таким порошкам значительно ниже, чем к порошкам из карбонатных горных пород. В этой статье рассматривается применение активированного в газовой фазе минерального порошка, что решит проблему низкой адгезии. Для улучшения деформативных свойств асфальтобетона при отрицательных температурах предложено использовать полимерно-битумное вяжущее.

Влияние полимерно-битумных вяжущих на свойства асфальтобетона

Многие исследователи считают, что причиной разрушений асфальтобетонов при пониженных температурах является недостаточно высокое качество вяжущих, а именно, их низкотемпературные свойства [1], [2], [3]. Разрывы или смещения в асфальтобетонном слое происходят, согласно наблюдениям, преимущественно по битуму. В то же время асфальтобетоны на полимерно-битумном вяжущем имеют более благоприятную поровую структуру, где значительная часть пор, более 60%, является замкнутой [4]. Использование полимерно-битумных вяжущих (ПБВ)

позволяет повысить атмосферную стойкость покрытий и увеличить срок их службы. Более высокая деформативность асфальтобетонов при отрицательных температурах и, следовательно, повышенная трещиностойкость дорожных покрытий создает предпосылки для их применения в районах с низкими зимними температурами. Существенной особенностью пор, с точки зрения их влияния на морозостойкость асфальтобетона, является их размер. В мелких порах вода присутствует в виде тонких адсорбционных слоев на внутренней поверхности пор и поэтому замерзает при более низких температурах. Поэтому многие циклы попеременного замораживания и оттаивания проходят бесследно для адсорбционно связанной воды и не оказывают разрушающего влияния на асфальтобетон [5]. Использование ПВБ способствует созданию более благоприятной структуры пор в плане морозостойкости.

Влияние активации минерального порошка на свойства асфальтобетона

Содержание минерального порошка в асфальтобетоне, как правило, от 7 до 9% по массе, однако удельная поверхность зерен составляет от 80 до 90% от общей поверхности минеральных частиц, поэтому важна хорошая адгезия именно к минеральному порошку. Не всегда в наличии имеется карбонатный минеральный порошок, часто в этой роли используют местные отходы промышленности. Для улучшения адгезии используют различные методы [6]. Например, в статье [7] рассмотрено применение гидрофобизатора ГФ производства ООО «Селена», для активации минерального порошка из отходов промышленности и его влияние на изменение физико-механических характеристик асфальтобетона. В работе [8] рассматривается получение активированного порошка из кварцевого песка с добавкой битума. В нашей статье рассматривается совместное влияние активированной в газовой фазе золы ТЭС (золошлака), используемой в качестве минерального порошка для асфальтобетона, одновременно с применением полимерно-битумного вяжущего.

Методы и результаты экспериментальных исследований

Золы дальневосточных ТЭС обладают ярко выраженной кислотностью, поэтому на поверхности раздела фаз битума и минерального порошка из отходов ТЭС будут протекать реакции физического характера без образования водонерастворимых мыл, это приведет к получению асфальтобетона с невысокими прочностными характеристиками в водонасыщенном состоянии. Изменить поверхностные свойства кислых минеральных материалов предлагается с помощью газовой гидрофобизации. Такой способ совмещает сушку золы с ее газовой гидрофобизацией [9]. Гидрофобизирующий газ получают нагревом активирующей смеси на основе битума до температуры 220 – 350°C. В процессе гидрофобизации с поверхности минерального порошка удаляется влага, а затем на ней адсорбируется слой гидрофобизатора. Генератор гидрофобизирующего газа переводит органический активатор типа битума, гудрона и других материалов, имеющих гидрофобные составляющие, в активное радикализированное состояние за счет термической деструкции молекул в атмосфере с обедненным содержанием кислорода, что необходимо для сохранения активности осколков молекул и избежания выгорания. В конкретном примере генератор выполнен в виде циклона с нагревающими элементами. Аэродисперсная смесь поступает в камеру в виде вихревого потока. Расход активатора 0,5% от массы золошлака.

В качестве минерального порошка использовалась зола (золошлак) ТЭС. В соответствии с ГОСТ 32761 [10] золошлак относится к марке МП-3 — минеральный порошок из порошковых отходов промышленного производства. В качестве вяжущего применялись дорожный битум БНД°90/130 и полимерно-битумное вяжущее ПВБ°90, то есть условная вязкость обоих вяжущих одинакова. Испытания проводились на песчаном асфальтобетоне, так как в нем содержится повышенное количество минерального порошка и поэтому более ярко выражено влияние золы ТЭС. В связи с повышенным содержанием минерального порошка, такой асфальтобетон требует и повышенного содержания органического вяжущего. На основании результатов испытания асфальтобетонов на исходном золошлаке, на активированном в газовой фазе битума и на активированном золошлаке, с применением полимерно-битумного вяжущего, были получены регрессионные зависимости физико-механических свойств асфальтобетона от его состава. В качестве факторов, определяющих состав смеси и влияющих на свойства асфальтобетона, приняты: содержание вяжущего (сверх 100%) — x_1 , отношение минерального порошка на основе золошлака к песку — x_2 . Результаты испытаний приведены ниже (табл. 1).

Таблица 1 - Зависимость показателей качества асфальтобетона от вида минерального порошка и количества и состава вяжущего

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.59.1>

Битум или ПВБ, %	Коэффициент водостойкости			Водонасыщение, %		
	Битум, зола ТЭС	Битум, актив. зола ТЭС	ПВБ, актив. зола ТЭС	Битум, зола ТЭС	Битум, актив. зола ТЭС	ПВБ, актив. зола ТЭС
7,17	0,75	0,89	0,92	10,4	8,1	7,5
8,00	0,75	0,93	0,95	9,7	7,7	6,6
10,00	0,77	0,89	0,95	4,9	2,1	1,5
12,00	0,78	0,85	0,96	0,7	1,2	1,2
12,83	0,8	0,78	0,90	0,2	1,1	0,8

На долговечность асфальтобетона в значительной степени влияет коэффициент водостойкости (рис. 1), который зависит от прочности сцепления вяжущего с минеральными материалами и от открытой пористости асфальтобетона

[11]. При сравнении двух первых составов, повышение коэффициента водостойкости можно объяснить значительно большей адгезией битума к золошлаковому минеральному порошку. К поверхности минерального порошка, покрытого тончайшей углеводородной пленкой, углеводородное вяжущее прилипает лучше.

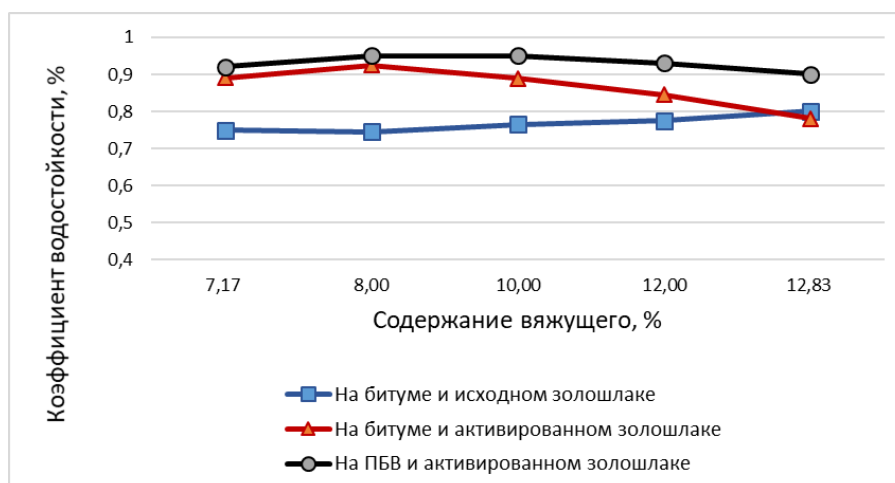


Рисунок 1 - Зависимость коэффициента водостойкости от содержания и вида применяемого вяжущего и минерального порошка

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.59.2>

Результаты испытаний показали повышение коэффициента водостойкости и для асфальтобетона с ПБВ, которое можно объяснить повышенным количеством замкнутых пор при практически одинаковой общей пористости, а также повышенными когезионными свойствами ПБВ. Увеличение количества замкнутых пор можно проследить по водонасыщению испытанных образцов, которое численно равно открытой пористости. Влияние состава асфальтобетона на его водонасыщение приведено на графике (рис. 2).

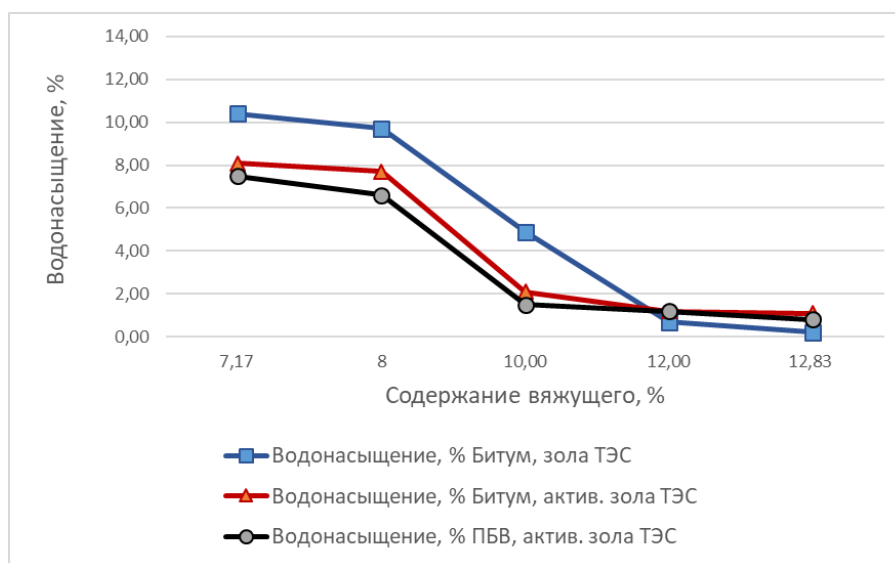


Рисунок 2 - Зависимость водонасыщения от содержания и вида применяемого вяжущего и минерального порошка

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.59.3>

Водонасыщение — свойство от которого, наряду с коэффициентом водонасыщения, зависит продолжительность службы асфальтобетона, так как попадающая в поры вода отслаивает пленку вяжущего, а в зимнее время вода, замерзая, увеличивается в объеме и разрушает структуру асфальтобетона. Оптимальное его количество для данного состава асфальтобетона.

После обработки результатов испытаний были получены уравнения регрессии. Регрессионные зависимости, характеризующие водостойкость асфальтобетона с применением отходов ТЭС приведены ниже:

– для асфальтобетонов на исходном золошлаке:

$$K_{\text{в}} = 0,053\tilde{x}_1^2 - 0,044\tilde{x}_2^2 + 0,756 \quad (1)$$

где $K_{\text{в}}$ — коэффициент водостойкости асфальтобетона,

– на золошлаке, активированном в газовой фазе битума:

$$K_B = 0,016\tilde{x}_1^2 - 0,032\tilde{x}_2^2 + 0,957 \quad (2)$$

– на золошлаке, активированном в газовой фазе битума, на полимерно-битумном вяжущем

$$K_B = 0,025\tilde{x}_1^2 - 0,033\tilde{x}_2^2 + 0,975 \quad (3)$$

Анализ регрессионных зависимостей показывает, что водостойкость возрастает при использовании активированного золошлака и, еще в большей степени, при одновременном использовании активированного золошлака и полимерно-битумного вяжущего. Это показывают результаты испытаний и свободные члены уравнений регрессии. Полученные уравнения отражают тот факт, что увеличение количества вяжущего повышает водостойкость, а увеличение количества золошлака снижает этот показатель. Использование активированных минеральных порошков и применение ПБВ делает снижение водостойкости менее выраженным.

Асфальтобетоны на гидрофобизированных отходах ТЭС имеют меньшее водонасыщение, чем асфальтобетоны на исходном золошлаке с таким же количеством битума. Наибольший эффект обеспечивается при оптимальном или при недостаточном количестве битума. При избытке битума показатели водонасыщения отличаются незначительно.

Применение ПБВ позволяет получать асфальтобетоны с преобладанием мелких замкнутых пор, что повышает их водостойкость и атмосферостойкость. По результатам представленных испытаний, 10% вяжущего — это оптимальное количество для данного состава асфальтобетона. Был определен предел прочности при сжатии образцов асфальтобетона с этим содержанием вяжущего для трех составов при температурах 0 и 50°C (табл. 2).

Таблица 2 - Зависимость прочности асфальтобетона от вида минерального порошка и количества и состава вяжущего

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.59.4>

Битум или ПБВ, %	Прочность при 50°C			Прочность при 0°C		
	Битум, зола ТЭС	Битум, актив. зола ТЭС	ПБВ, актив. зола ТЭС	Битум, зола ТЭС	Битум, актив. зола ТЭС	ПБВ, актив. зола ТЭС
10,00	0,93	1,36	1,41	7,8	8,4	8,2

Прочность асфальтобетона при 50°C повышается, прочность при 0°C изменяется незначительно, однако следует отметить, что при низких температурах асфальтобетон не должен быть излишне прочным, так как вместе с прочностью возрастает его хрупкость. Использование ПБВ позволяет сохранить пластичность асфальтобетона при нулевой температуре, этим можно объяснить некоторое снижение прочности при 0°C.

Таким образом, активация минеральных порошков из местного сырья — золошлаковой смеси ТЭС, позволяет расширить номенклатуру применяемых минеральных порошков, снизить затраты на производство асфальтобетонных смесей без снижения качества материала. Полимерно-битумные вяжущие позволяют расширить интервал работоспособности битума, повысив, тем самым эксплуатационные качества асфальтобетона.

Заключение

Результаты исследования показали, что применение в качестве минерального порошка активированной в газовой фазе золы ТЭС, совместно с полимерно-битумным вяжущим, повышает коэффициент водостойкости асфальтобетона, снижает водонасыщение, расширяет температурный интервал работоспособности. Новизна заключается именно в совместном воздействии этих двух факторов и можно сделать вывод, что эффекты от одновременного применения активированной золы ТЭС и применения ПБВ суммируются. Исследование является оригинальным, данный метод гидрофобизации предложен профессором нашей кафедры Ярмолинской Н. И., но с использованием в качестве вяжущего дорожного битума, а не ПБВ. Данная работа продолжает и развивает эти исследования. Обзор литературных источников показал отсутствие работ на эту тему. Дополнительного исследования требуют долговечность полученного композиционного материала и некоторые другие его свойства. Недавно вступивший в действие ГОСТ Р 58406.2 – 2020 выдвигает новые требования к горячим асфальтобетонным смесям. Появился показатель средней глубины колеи, который, предположительно, может улучшиться благодаря применению ПБВ. Из дополнительных показателей интерес представляют остаточная прочность после воздействия реагентов и коэффициент длительной водостойкости. Предполагается, что эти показатели улучшатся благодаря активации минерального порошка. В этом направлении планируются дальнейшие исследования.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Ярмолинская Н.И. Повышение коррозионной стойкости асфальтобетонных покрытий на автомобильных дорогах юга Дальнего Востока / Н.И. Ярмолинская, Т.Л. Лазарева, Р.В. Семенова. — Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2014. — 126 с.
2. Галдина В.Д. Трещиностойкость асфальтобетонов на битумах различной структуры и происхождения / В.Д. Галдина // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. — 2010. — № 1 (26). — С. 209–217.
3. Кирюхин Г.Н. К оценке температурной трещиностойкости асфальтобетона / Г.Н. Кирюхин // Наука и техника в дорожной отрасли. — 2018. — № 1 (83). — С. 27–30.
4. Гохман Л.М. Перспективы применения полимерасфальтобетона / Л.М. Гохман // Автомобильные дороги. — 2021. — № 1. — С. 90–93.
5. Колбановская А.С. Дифференциальная пористость битумоминеральных материалов / А.С. Колбановская, Н.В. Горельшев. — Москва: Автотрансиздат, 1959. — 27 с.
6. Ковалёв Я.Н. Технологии активации строительных материалов / Я.Н. Ковалёв, Т.А. Чистова. — Минск: БНТУ, 2022. — 142 с.
7. Ядыкина В.В. Повышение эффективности минерального порошка из техногенного сырья за счет его гидрофобизации / В.В. Ядыкина, А.М. Гридчин, Е.В. Кузнецова [и др.] // Строительные материалы и изделия. — 2020. — Т. 3, № 4. — С. 24–30.
8. Гарманов В.Н. Применение активированных минеральных порошков из местного сырья для приготовления асфальтобетонных смесей / В.Н. Гарманов // Дороги и мосты. — 2019. — № 1 (41). — С. 234–246.
9. Ярмолинская Н.И. Повышение коррозионной стойкости асфальтобетона на основе отходов ТЭС / Н.И. Ярмолинская, Л.С. Цупикова // Строительные материалы. — 2007. — № 9. — С. 46–47.
10. ГОСТ 32761-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Порошок минеральный. Технические требования. — Москва: Стандартинформ, 2014. — 10 с.
11. Цупикова Л.С. Асфальтобетон с активированным минеральным порошком на полимерно-битумном вяжущем / Л.С. Цупикова, А.К. Никишатов // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного и дорожно-транспортного комплекса: материалы национальной научно-практической конференции: в 2 т. Вып. 24. — Хабаровск: ТОГУ, 2024. — Т. 1. — С. 209–211.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Yarmolinskaya N.I. Povyshenie korrozionnoj stojkosti asfal'tobetonnyh pokrytij na avtomobil'nyh dorogah juga Dal'nego Vostoka [Improving the corrosion resistance of asphalt concrete pavements on highways in the south of the Far East] / N.I. Yarmolinskaya, T.L. Lazareva, R.V. Semenova. — Khabarovsk: Pacific State University Publishing House, 2014. — 126 p. [in Russian]
2. Galdina V.D. Treshhinostojkost' asfal'tobetonov na bitumah razlichnoj struktury i proishozhdenija [Crack resistance of asphalt concretes on bitumens of different structure and origin] / V.D. Galdina // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta [Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering]. — 2010. — № 1 (26). — P. 209–217. [in Russian]
3. Kirjukhin G.N. K ocenke temperaturnoj treshhinostojkosti asfal'tobetona [On the assessment of thermal crack resistance of asphalt concrete] / G.N. Kirjukhin // Nauka i tehnika v dorozhnoj otrasli [Science and Technology in the Road Industry]. — 2018. — № 1 (83). — P. 27–30. [in Russian]
4. Gohman L.M. Perspektivy primenenija polimerasfal'tobetona [Prospects for the use of polymer asphalt concrete] / L.M. Gohman // Avtomobil'nye dorogi [Highways]. — 2021. — № 1. — P. 90–93. [in Russian]
5. Kolbanovskaya A.S. Differencial'naja poristost' bitumomineral'nyh materialov [Differential porosity of bitumen-mineral materials] / A.S. Kolbanovskaya, N.V. Gorelyshev. — Moscow: Avtotransizdat, 1959. — 27 p. [in Russian]
6. Kovalyov Ya.N. Tehnologii aktivacii stroitel'nyh materialov [Activation technologies for building materials] / Ya.N. Kovalyov, T.A. Chistova. — Minsk: BNTU, 2022. — 142 p. [in Russian]
7. Yadykina V.V. Povyshenie jeffektivnosti mineral'nogo poroshka iz tehnogenogo syr'ja za schet ego gidrofobizacii [Improving the efficiency of mineral powder from technogenic raw materials through its hydrophobization] / V.V. Yadykina, A.M. Gridchin, E.V. Kuznecova [et al.] // Stroitel'nye materialy i izdelija [Construction Materials and Products]. — 2020. — Vol. 3, № 4. — P. 24–30. [in Russian]
8. Garmanov V.N. Primenenie aktivirovannyh mineral'nyh poroshkov iz mestnogo syr'ja dlja prigotovlenija asfal'tobetonnyh smesej [Use of activated mineral powders from local raw materials for asphalt concrete mixtures] / V.N. Garmanov // Dorogi i mosty [Roads and Bridges]. — 2019. — № 1 (41). — P. 234–246. [in Russian]
9. Yarmolinskaya N.I. Povyshenie korrozionnoj stojkosti asfal'tobetona na osnove othodov TJeS [Improving the corrosion resistance of asphalt concrete based on thermal power plant waste] / N.I. Yarmolinskaya, L.S. Tsupikova // Stroitel'nye materialy [Construction Materials]. — 2007. — № 9. — P. 46–47. [in Russian]
10. GOST 32761-2014. Dorogi avtomobil'nye obshhego pol'zovanija. Poroshok mineral'nyj. Tehnicheskie trebovanija [GOST 32761-2014. Public roads. Mineral powder. Technical requirements]. — Moscow: Standartinform, 2014. — 10 p. [in Russian]
11. Tsupikova L.S. Asfal'tobeton s aktivirovannyim mineral'nym poroshkom na polimerno-bitumnom vjashhem [Asphalt concrete with activated mineral powder on polymer-bitumen binder] / L.S. Tsupikova, A.K. Nikishatov // Dal'nij Vostok: problemy razvitiya arhitekturno-stroitel'nogo i dorozhno-transportnogo kompleksa: materialy nacional'noj nauchno-prakticheskoi konferencii: v 2 t. Vyp. 24 [Far East: problems of development of architectural, construction and road-transport

complexes: Proceedings of the National Scientific-Practical Conference: in 2 vols. Issue 24]. — Khabarovsk: TOSU, 2024. — Vol. 1. — P. 209–211. [in Russian]