

Анализ фракционного состава каменного наполнителя асфальтобетонной смеси и оценка режимов приготовления вяжущего системы «битум – минеральный порошок»

Сергей Юрьевич Андронов¹ , Юрий Эмануилович Васильев² , Андрей Викторович Кочетков^{2,3} , Павел Алексеевич Слепнев^{4*} , Илья Александрович Чижиков⁴ 

¹ Саратовское региональное отделение Российской академии транспорта, 410015, Саратов, ул. Барнаульская, 2 «б», к. 8, Российская Федерация

² Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64, Российская Федерация

³ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614000, Пермь, Комсомольский проспект, 29, Российская Федерация

⁴ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: slepnevpa@mgsu.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Фракционный состав каменного наполнителя асфальтобетонной смеси и режимы приготовления вяжущего системы «битум – минеральный порошок» оказывают значительное влияние на эксплуатационные характеристики асфальтобетонных смесей. Учитывая, что объем наполнителя асфальтобетонных смесей достигает 96% по массе или 87% по объему смеси, а объем связующего составляет до 4% по массе или до 13% по объему, в процессе приготовления асфальтобетонной смеси стремятся добиться ее однородности и обеспечить полное покрытие наполнителя связующим. Однако при недостатке связующего остаются пустоты, которые приводят к увеличению водопоглощения. **Материалы и методы.** На основании оптических исследований фракционного состава стандартной асфальтобетонной смеси определены площади межфазного взаимодействия между каменным наполнителем и битумом, согласующиеся с результатами других исследователей. На основе анализа экспериментальных и теоретических исследований установлены зависимости коэффициента взаимодействия в системе «битум – минеральный порошок» от дисперсионного состава, температуры и степени наполнения. **Результаты и обсуждение.** Анализ полученных данных доказывает, что взаимодействие битума и минерального порошка подчиняется определенным закономерностям и зависит от объемного распределения по размерам частиц во фракциях минерального порошка, что определяет площадь межфазной поверхности взаимодействия; температуры смешения и степени наполнения композиции – оптимальные условия: температура от 160 °С до 170 °С, объемная доля 0,17–0,2. **Заключение.** Выбранную рецептуру асфальтобетонной смеси, которая исследовалась в работе и содержит объемную долю микропорошка на уровне 0,258, необходимо откорректировать в сторону увеличения массы битума до 2,0 кг с тем, чтобы попасть в оптимум по взаимодействию минерального порошка и битума. Полученные результаты позволяют скорректировать состав асфальтобетонной смеси с целью повышения ее эксплуатационных характеристик.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пористость каменных материалов, адгезия битума, адсорбция битума частицами, минеральный порошок, уплотненная асфальтобетонная смесь, моделирование структуры асфальтобетона

БЛАГОДАРНОСТИ: Статья посвящена светлой памяти нашего коллеги доктора технических наук, профессора Артеменко Александра Александровича, работавшего в Саратовском государственном техническом университете имени Ю.А. Гагарина. Авторы статьи выражают ему признательность за проведенные консультации при ее подготовке.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Андронов С.Ю., Васильев Ю.Э., Кочетков А.В., Слепнев П.А., Чижиков И.А. Анализ фракционного состава каменного наполнителя асфальтобетонной смеси и оценка режимов приготовления вяжущего системы «битум – минеральный порошок». *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(2):180–191. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-180-191>. – EDN: ZXSMOA.

Analysis of the fractional composition of the stone filler in the asphalt concrete mixture and evaluation of the preparation modes for the 'bitumen–mineral powder' binder system

Sergey Yu. Andronov¹ , Yuri E. Vasiliev² , Andrey V. Kochetkov^{2,3} , Pavel A. Slepnev⁴ , Ilya A. Chizhikov⁴ 

¹ Saratov Regional Branch of the Russian Academy of Transport, 410015, Saratov, Barnaulskaya St., 2 "b", bldg. 8, Russian Federation

² Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, 125319, Moscow, Leningradsky Prospekt, 64, Russian Federation

³ Perm National Research Polytechnic University, 614000, Perm, Komsomolsky Prospekt, 29, Russian Federation

⁴ National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: slepnevpa@mgsu.ru

ABSTRACT

Introduction. The fractional composition of the stone filler in asphalt concrete mixtures and the preparation modes of the binder in the "bitumen – mineral powder" system have a significant impact on the performance characteristics of asphalt concrete mixtures. Considering that the filler volume of asphalt concrete mixtures reaches 96% by weight or 87% by volume of the mixture, and the binder volume is up to 4% by weight or up to 13% by volume. During the preparation of the asphalt concrete mixture, efforts are made to achieve its homogeneity and ensure complete coverage of the filler with binder. However, a lack of binder leaves voids, which lead to increased water absorption. **Materials and methods.** Based on optical studies of the fractional composition of a standard asphalt concrete mixture, the areas of interphase interaction between the stone filler and bitumen were determined, consistent with the results of other researchers. Based on the analysis of experimental and theoretical studies, the dependences of the interaction coefficient in the "bitumen – mineral powder" system on the dispersion composition, temperature, and filling degree were established. **Results and discussion.** Analysis of the obtained data proves that the interaction between bitumen and mineral powder follows certain patterns and depends on the volumetric particle size distribution within the mineral powder fractions, which determines the interfacial surface area of interaction. The optimal conditions for mixing temperature and composition filling are: temperature from 160 °C to 170 °C, volume fraction of 0.17–0.2. **Conclusion.** The selected asphalt concrete mixture formulation, which was studied in this study and contains a volume fraction of micropowder at the level of 0.258, must be adjusted upwards by increasing the bitumen mass to 2.0 kg in order to achieve the optimum interaction between mineral powder and bitumen. The obtained results allow for adjustments to the asphalt concrete mixture composition in order to improve its performance characteristics.

KEYWORDS: porosity of aggregates, bitumen adhesion, bitumen adsorption by particles, mineral powder, compacted asphalt concrete mixture, asphalt concrete structure modeling

ACKNOWLEDGMENTS: This article is dedicated to the memory of our colleague, Doctor of Engineering Sciences, Professor Alexander Alexandrovich Artemenko, who worked at the Yu.A. Gagarin Saratov State Technical University. The authors express their gratitude to him for his consultations during its preparation.

FOR CITATION:

Andronov S.Yu., Vasiliev Yu.E., Kochetkov A.V., Slepnev P.A., Chizhikov I.A. Analysis of the fractional composition of the stone filler in the asphalt concrete mixture and evaluation of the preparation modes for the 'bitumen–mineral powder' binder system. *Nanotechnologies in construction*. 2026;18(2):180–191. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-180-191>. – EDN: ZXSMOA.

ВВЕДЕНИЕ

При создании асфальтобетонных смесей (АБС) основное внимание уделяется подбору гранулометрического состава каменного материала – наполнителя, обеспечивающего максимальное заполнение объема смеси. Это обеспечивает устойчивость дорожного покрытия к нагрузкам и деформациям, возникающим при эксплуатации дорожного покры-

тия. При этом объем наполнителя достигает 94–96% по массе или 85–87% по объему смеси. Дальнейшее уплотнение при повышенной температуре, когда связующее – битум – находится в жидкотекучем состоянии, позволяет получать покрытие, удовлетворяющее основным современным требованиям к дорожному покрытию. Однако анализ действующей нормативной документации и практические исследования показывают, что уложенному дорож-

ному покрытию присущи недостатки, которые проявляются в неблагоприятных условиях и приводят к его разрушению. В первую очередь это относится к такой нормируемой характеристике, как водопоглощение.

В перечне литературы [1–21] в целом отражен современный технический уровень разработки данной темы. В перечне [1–12] представлены одни из известных отечественных работ по направлению настоящей статьи. Собственные публикации авторов иллюстрируются работами [13, 14]. Зарубежные публикации представлены в перечне [14–21].

В процессе получения АБС стремятся обеспечить такое распределение вяжущего, чтобы битум покрывал сплошной пленкой все частицы каменного материала. Поэтому в случае недостаточного содержания битума не происходит полного покрытия каждой частицы пленкой битума, что способствует проникновению влаги через открытые места, отслаиванию битумной пленки и дальнейшему разрушению асфальтобетонного покрытия. С другой стороны, избыток битума приводит к его вытеснению из областей повышенного напряжения (при уплотнении) и созданию зон с меньшей плотностью распределения каменного материала, что ухудшает прочность и долговечность асфальтобетонного покрытия.

На первый взгляд, анализируя состав компонентов асфальтобетона, можно отметить, что связующее – битум – является гидрофобным материалом, и не может без специальной обработки поглощать воду. Другое дело – наполнители: щебень, песок, минеральный порошок. Эти каменные материалы имеют открытые поры на поверхности и способны впитывать воду. Технология приготовления смеси на асфальтобетонном заводе предусматривает, что при перемешивании при высокой температуре битум должен полностью покрывать поверхности частиц, адсорбироваться в поры и исключать попадание влаги извне в структуру смеси после ее укладки и уплотнения.

Следует отметить, что такая высокая степень наполнения при минимуме связующего требует провести оценку возможности создания непрерывной пленки на поверхности частиц наполнителя и проанализировать характеристики асфальтобетона в случае ее недостаточности. Кроме того, следует учитывать то обстоятельство, что битумная пленка, покрывающая частицы, неравномерно распределена по толщине из-за различного рельефа поверхностей частиц и в зависимости от их крупности и природы [1]. Из-за адсорбционного взаимодействия битума и минеральных частиц АБС эффективный объем наполнителя увеличивается. Толщина адсорбционного слоя на частицах размером от 3 до 10 мм изменяется в пределах 1,2–17 мкм.

Для того чтобы оценить толщину пленки при выбранной рецептуре АБС, необходимо определиться с площадью поверхности частиц разных форм и размеров, что при существующих методах исследований представляет серьезную проблему. Достаточно часто такие измерения проводятся путем анализа частиц по фотографиям, сделанным оптической микроскопией. Однако следует учитывать, что микроскопические снимки позволяют визуализировать только плоские проекции частиц, поэтому размеры частиц неправильной формы можно описать несколькими параметрами и характеристиками: максимальный или минимальный диаметр (линейный размер), максимальная длина, минимальная длина, объем, площадь поверхности и т.д. Как следствие, размеры, полученные разными методами, будут различаться. На рис. 1 показаны различные варианты ответов на вопрос, что есть размеры частицы, представленные в виде эквивалентных сфер. При этом ошибочных результатов нет – каждый ответ субъективно корректен: он отражает физически измеряемую характеристику [2, 9, 10].

Эта теория эквивалентной сферы. Измеряя некоторые характеристики частицы, предполагаем, что они относятся к сфере, рассчитываем универсальное число (диаметр этой сферы), которое характеризует нашу частицу. Этот пример наглядно подтверждает, что нет необходимости описывать размер частицы тремя или более числовыми значениями, которые, конечно, более точно выражают размер, но сложны и неудобны при составлении смесей. Представленная расчетная методика позволяет за короткое время смоделировать предположительно оптимальное распределение частиц по размерам, оперируя только соотношениями массовых долей исходных компонентов в смеси.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования частиц каменного материала АБС по методу эквивалентной сферы проводили после дисперсионного анализа каждой фракции асфальтобетона (щебень, отсев, песок, минеральный порошок). В качестве объекта исследований приняли стандартную АБС, состав которой представлен в табл. 1.

Поскольку масса каждой фракции в составе смеси строго дозируется, то, зная дисперсный состав и плотность материала (ρ), можно приблизительно оценить количество сфер с эквивалентной площадью поверхности, приходящихся на каждую размерную группу (n_i), и общую площадь их поверхности (s_i).

Суммируя площади каждой фракции, получим оценочную площадь поверхности частиц каменного материала в АБС определенной массы (S). При рас-

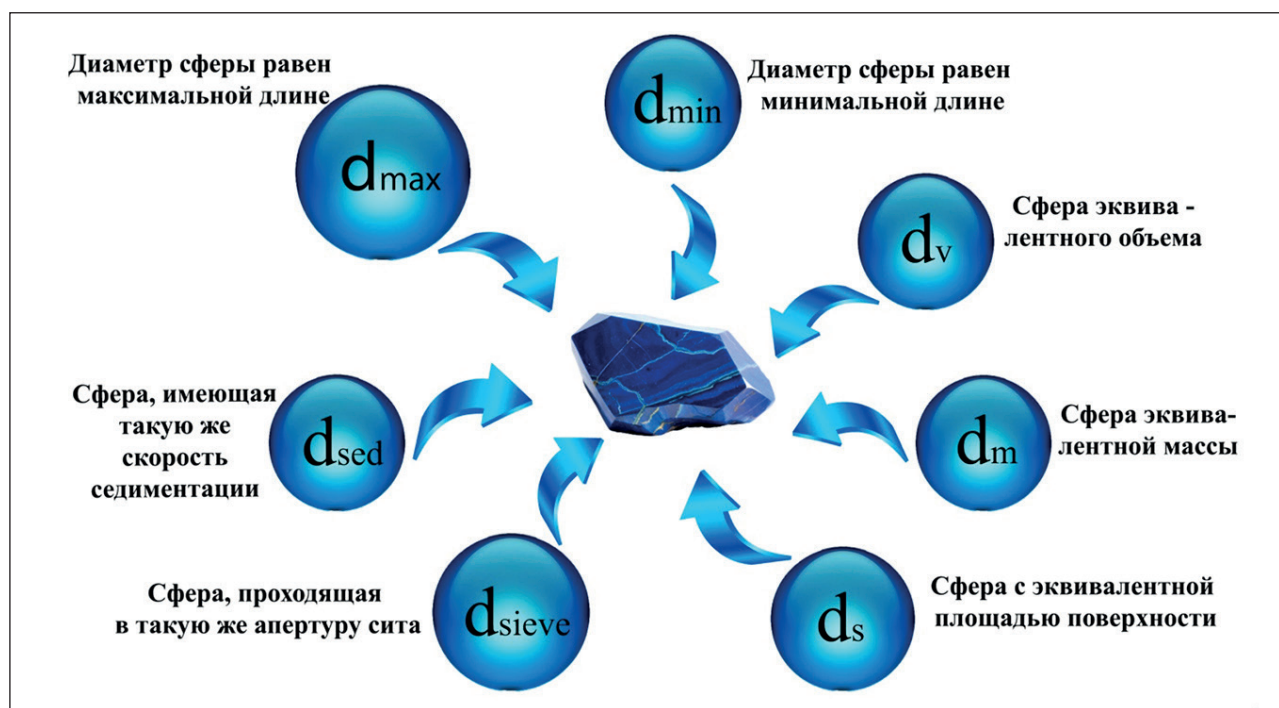


Рис. 1. Диаметры эквивалентных сфер [2]

Таблица 1. Состав асфальтобетонной смеси марки I тип Б

№	Материал	Содержание, %
1	Гранитный щебень фр. 5–15	41,7
2	Песок из отсевов дробления	43,7
3	Песок природный мелкий	4,7
4	Порошок минеральный МП-1	4,7
5	Битум марки БНД 60/90	5,2
Всего		100,0

четах использовали классические геометрические формулы:

$$\text{объем } i\text{-ой сферы: } V_i = \pi \cdot (D_i^3)/6$$

$$\text{масса } i\text{-ой сферы: } m_i = \rho \cdot V_i = \rho \cdot \pi \cdot (D_i^3)/6$$

$$\text{количество сфер каждой фракции: } n_i = k_i \cdot M_i / m_i,$$

где k_i , m_i – доля i -ой размерной группы и ее масса соответственно, M_i – масса фракции;

$$\text{площадь поверхности сферы: } s = \pi \cdot D^2$$

$$\text{площадь поверхности } i\text{-ой фракции:}$$

$$s_i = n_i \cdot \pi \cdot D_i^2 = k_i \cdot M_i \cdot \pi \cdot D_i^2 /$$

$$m_i = \frac{k_i \cdot M_i \cdot \pi \cdot D_i^2 \cdot 6}{\rho \cdot \pi \cdot D_i^3}.$$

При плотности каменного материала $\rho \sim 2700 \text{ кг/м}^3$ получаем:

$$S_i = \frac{6 \cdot 10^3}{2700} \cdot \frac{k_i \cdot M_i}{D_i} = 2,22 \cdot \frac{k_i \cdot M_i}{D_i};$$

площадь поверхностей всех фракций $S = \sum s_i$.

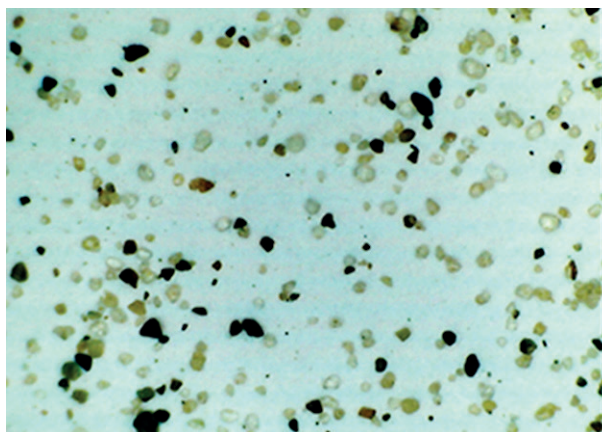
Изучение дисперсного состава каждой фракции АБС проводили по электронным снимкам, полученным с оптического микроскопа. Анализ снимков обрабатывали в программе «DG Analyzer 1.5», которая позволяет бинаризировать изображения, т.е. выставить порог светлых и темных участков на картинке и проанализировать полученный объект (рис. 2). Статистические результаты обработки изображений программа представляет в численном и графическом виде. Программа позволяет получить значения относительного количества белых пикселей, периметра и площади микроструктурных элементов, средних приведенных диаметров элементов, выявить ориентированность светлых участков.

Дисперсный состав АБС, состоящей из различных фракций каменного материала, представлен на рис. 3–6.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты теоретической оценки площади поверхностей фракций АБС представлены в табл. 2. В качестве диаметров D_i на гистограммах выбирали среднее значение размерного диапазона по каждому долевого объему – например, в диапазоне 50–

Исходное изображение



Бинарное изображение

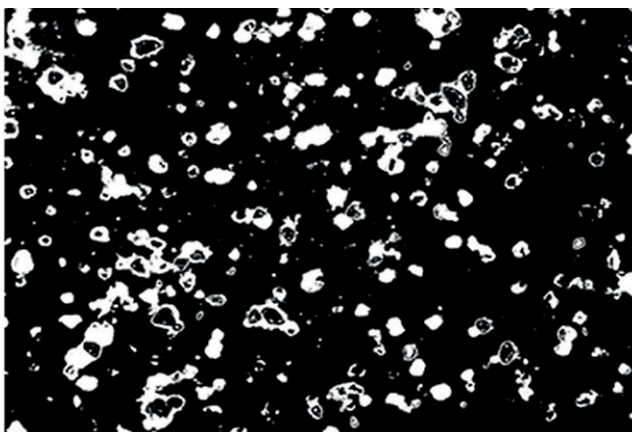


Рис. 2. Изображение «Песок» (увеличение в 25 раз)

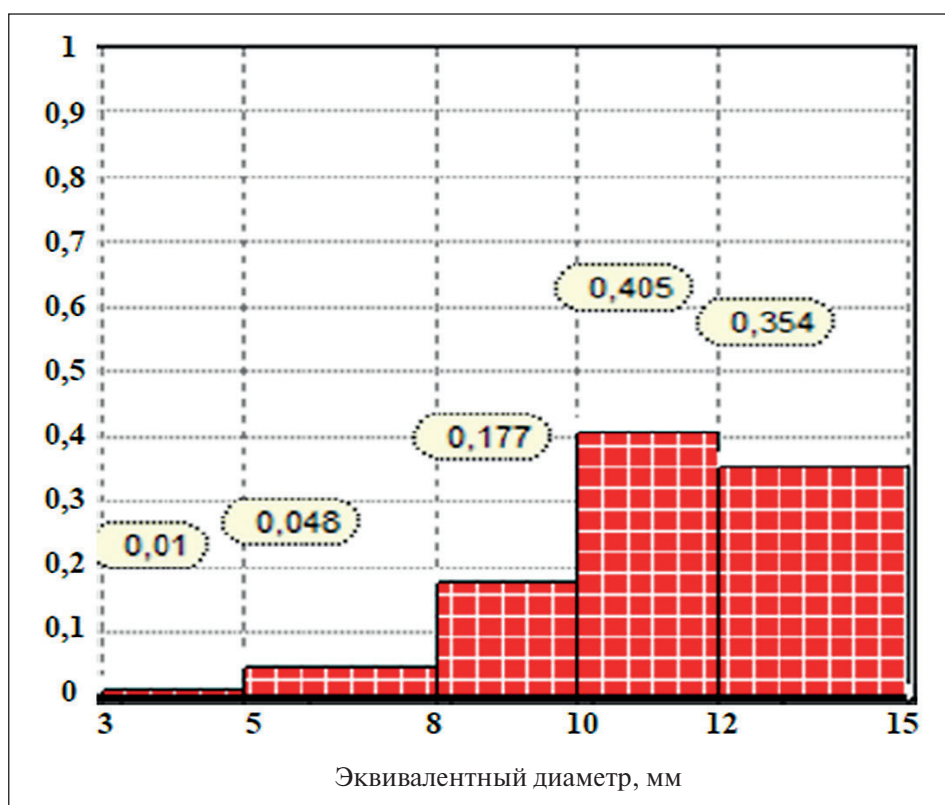


Рис. 3. Гистограмма долевого объема по диаметру частиц щебня

70 мкм средний эквивалентный диаметр принимали $(50+70)/2 = 60$ мкм.

Полученные результаты расчетов согласуются с данными работ [4, 7, 8, 11, 12] о том, что формирование межфазной границы «битум – каменные частицы» в АБС осуществляется за счет МП.

Введение МП в битум повышает вязкость последнего и прочность покрытия, при этом по мере увеличения концентрации МП толщина пленки битума

между минеральными зёрнами уменьшается и вяжущее постепенно переходит в структурированное состояние [4].

В результате происходит уменьшение расстояния между частицами до уровня, когда свойства системы «битум – частицы» определяются энергией взаимодействия адсорбционно-сольватных слоев органического вяжущего на поверхности МП [4]. Кроме того, МП, полученный из мраморных и доломитовых

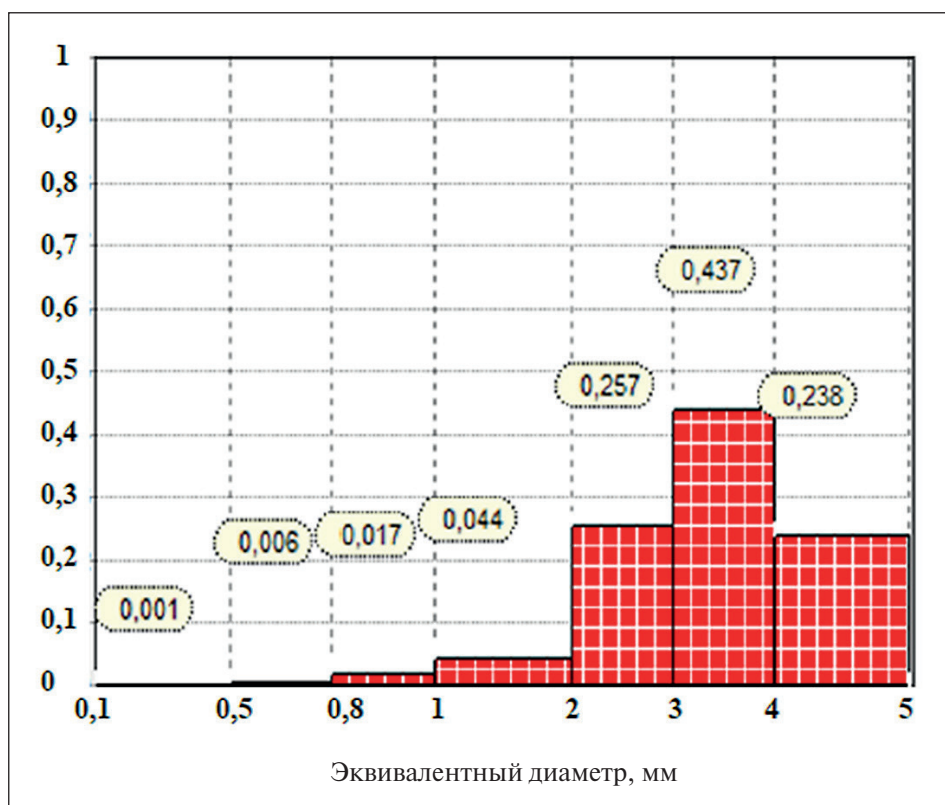


Рис. 4. Гистограмма долевого объема по диаметру частиц отсева дробления

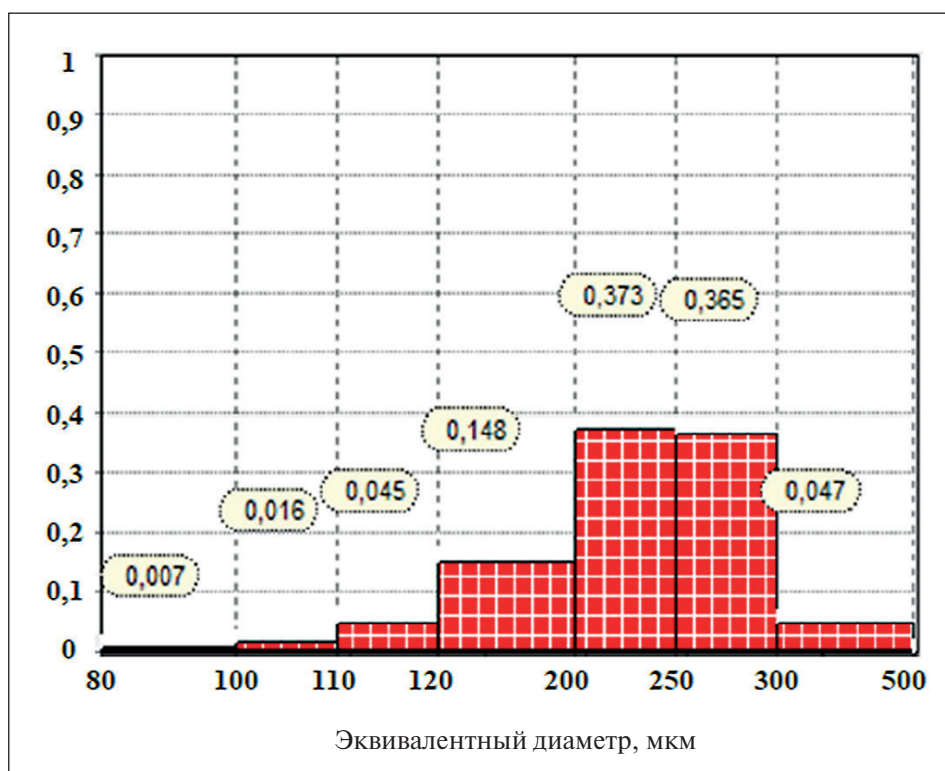


Рис. 5. Гистограмма долевого объема по диаметру частиц песка

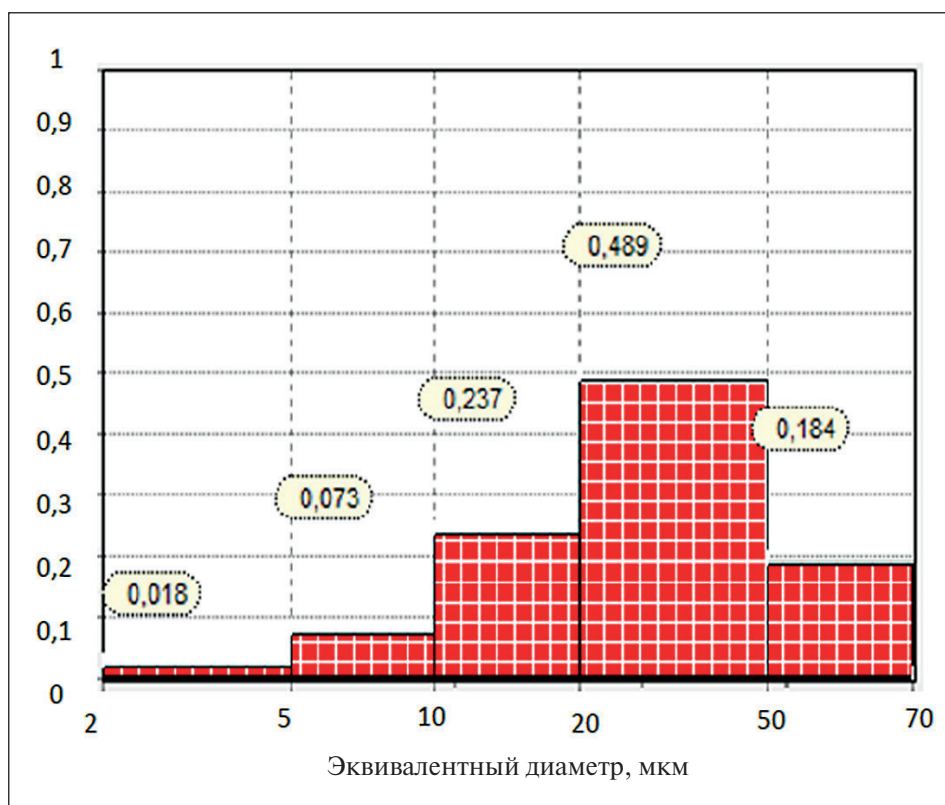


Рис. 6. Гистограмма долевого объема по диаметру частиц МП-1

пород, обладает высоким положительным потенциалом с большим количеством адсорбционных центров в виде катионов Ca^{+2} и Mg^{+2} и способствует более интенсивному переводу битума в структурированное состояние с образованием хемоадсорбционных связей, которые позволяют прочно удерживать битумные пленки на поверхности, тем самым повышая прочность асфальто вяжущего [5].

Введение минерального порошка в битум при высокой температуре приводит к образованию суспензии полифракционного состава. Суспензия представляет собой смесь веществ, где твердое вещество распределено в виде мельчайших частиц в жидком веществе во взвешенном (неосевшем) состоянии [6]. Вязкость такой системы зависит от соотношения объемных концентраций частиц наполнителя (МП) и жидкой фазы, формы твердых частиц, их распределения по размерам, вязкости жидкой среды (битума) и характера взаимодействия твердой и жидкой фаз между собой.

Анализ механизмов, определяющих реологические характеристики суспензии МП в битуме, проводили на модели, представляющей частицы в виде сфер и на основе данных, полученных в результате дисперсионного анализа (рис. 6). Испытания суспензий проводили на ротационном вискозиметре

Rheotest RV2.1 при температурах 130–170 °С, соответствующих режимам смешения битума и МП.

Для расчета вязкости системы «битум – твердые сферические частицы» использовали уравнение Муни, показывающее хорошее соответствие с экспериментальными данными при расчетах концентрированных суспензий [8,9]:

$$\eta = \eta_{\text{ср}} \cdot \exp \left[\frac{K_{\text{вз}} \cdot \Phi}{\Phi_{\text{м}} - \Phi} \right], \quad (1)$$

где η – эффективная вязкость суспензии, Па·с;

$\eta_{\text{ср}}$ – эффективная вязкость суспензионной среды, Па·с;

$K_{\text{вз}}$ – коэффициент, учитывающий взаимодействие твердых частиц с суспензионной средой и между собой;

$\Phi_{\text{м}}$ – максимальная объемная концентрация наполнителя, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

Φ – объемная концентрация наполнителя, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

В полидисперсной системе, которую представляет фракция МП (рис.6), определим средний эквивалентный диаметр:

$$d_{\text{экр}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{K_i}{D_i}} = \frac{1}{\frac{0,018}{0,0035} + \frac{0,073}{0,0075} + \frac{0,237}{0,015} + \frac{0,489}{0,035} + \frac{0,184}{0,06}} = \frac{1}{47,35} = 0,021 \text{ мм} = 21 \text{ мкм}. \quad (2)$$

Таблица 2. Результаты анализа фракционного состава

Материал	M_i , кг	k_i	D_i , мм	s_i , м ²	S_i , м ²	Доля в суммарной пл., %	Удельная поверхность фракции, м ² /кг
Щебень фр. 5–15	41,7	0,354	13,5	2,4	8,5	0,25	0,2
		0,405	11	3,4			
		0,177	9	1,8			
		0,048	6,5	0,7			
		0,01	4	0,2			
Отсевы дробления	43,6	0,238	4,5	5,1	31,8	0,9	0,73
		0,437	3,5	12,1			
		0,257	2,5	10			
		0,044	1,5	2,8			
		0,017	0,9	1,8			
Песок	4,75	0,047	0,4	1,2	49	1,45	10,3
		0,365	0,27	14,2			
		0,373	0,22	18			
		0,148	0,16	9,7			
		0,045	0,115	4,1			
		0,016	0,1	1,7			
МП-1	4,75	0,184	0,06	32,3	557	86,2	117,3
		0,489	0,035	147,3			
		0,237	0,015	156,8			
		0,073	0,0075	166,6			
		0,018	0,0035	54,2			
Битум БНД 60/90	5,2				646		

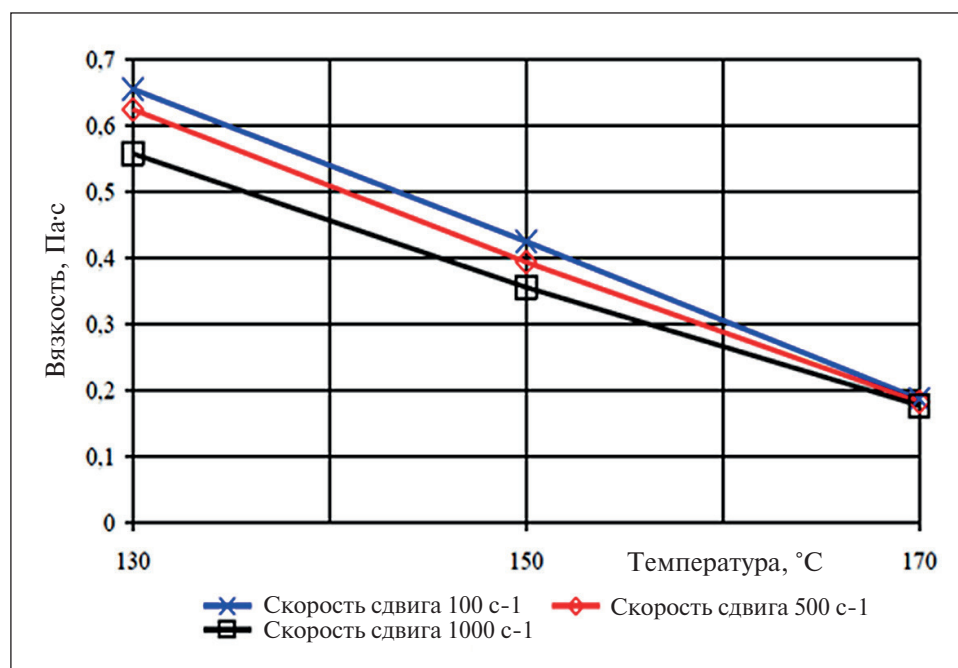


Рис. 7. Зависимость динамической вязкости битума η от температуры при скоростях сдвига 100, 500, 1000 с-1

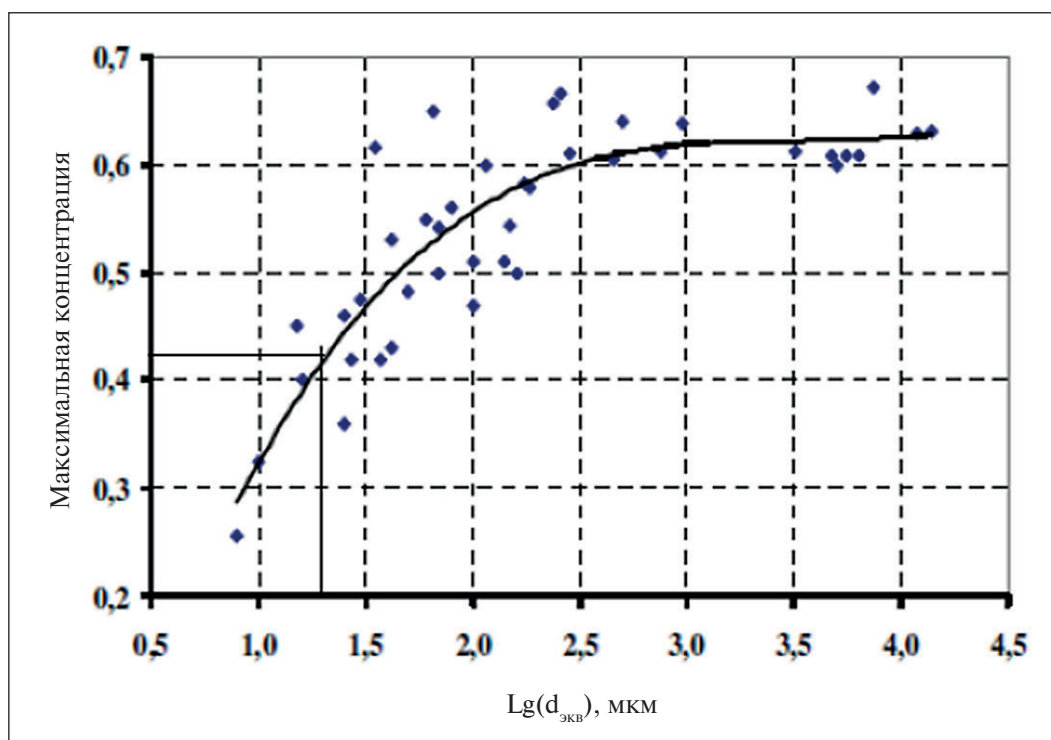


Рис. 8. Зависимость максимальной объемной концентрации наполнителя от диаметра частиц [8]

Используя зависимость, полученную в работе [8], определим максимальную объемную концентрацию наполнителя, имеющего $d_{экв}$ (рис. 8), учитывая, что $lg(21) = 1,32$. Этому эквивалентному диаметру соответствует максимальная объемная концентрация наполнителя $\sim 0,42$ (рис. 8), что в пересчете на массовую концентрацию соответствует соотношению битум : МП = 43 : 57, принимая плотность битума и МП $\rho_b = 1,03 \text{ г/см}^3$, $\rho_{МП} = 2,7 \text{ г/см}^3$.

Уравнение (1) перепишем в виде:

$$\eta = \eta_c \cdot \exp(a \cdot K_{вз}) = \eta_c \cdot \exp(K_{вз})^a, \quad (3)$$

$$\text{где } a = \frac{\Phi}{\Phi_M - \Phi}.$$

Из (3) получаем: $\exp(K_{вз}) = \sqrt[a]{\eta_{отн}}$, тогда

$$K_{вз} = \ln(\exp(K_{вз})) = \ln[\sqrt[a]{\eta_{отн}}]. \quad (4)$$

Уравнение (4) позволяет по результатам экспериментов с наполненными системами определить $K_{вз}$ – коэффициент, учитывающий взаимодействие твердых частиц МП с битумом и между собой. Сравнение экспериментальных и расчетных (4) значений реологических характеристик системы «битум БНД 60/90 – МП» приведены в таблице 3 и на рисунках 9, 10.

Анализ полученных данных доказывает, что взаимодействие битума и минерального порошка

Таблица 3. Вязкость дисперсной системы «Битум – МП»

Степень наполнения, % (объемная доля)	T = 130 °C		T = 150 °C		T = 170 °C		$\eta_{отн}$		
	η , Па·с	$K_{вз}$	η , Па·с	$K_{вз}$	η , Па·с	$K_{вз}$	130 °C	150 °C	170 °C
0 (0)	0,66	0	0,42	0	0,18	0	1	1	1
5 (0,05)	0,78	1,23	0,5	1,29	0,22	1,47	1,18	1,19	1,22
10 (0,10)	1,18	1,9	0,72	1,73	0,34	2,05	1,8	1,71	1,89
15 (0,15)	2,25	2,2	1,31	2,03	0,98	3,01	3,4	3,12	5,4
20 (0,20)	5,56	2,34	3,56	2,35	2,8	3,01	8,42	8,48	15,55
25 (0,25)	12,46	2	7,9	2	6,25	2,4	18,88	18,81	34,7
30(0,3)	28,2	1,5	18,4	1,5	15,1	1,8	42,7	43,8	83,9

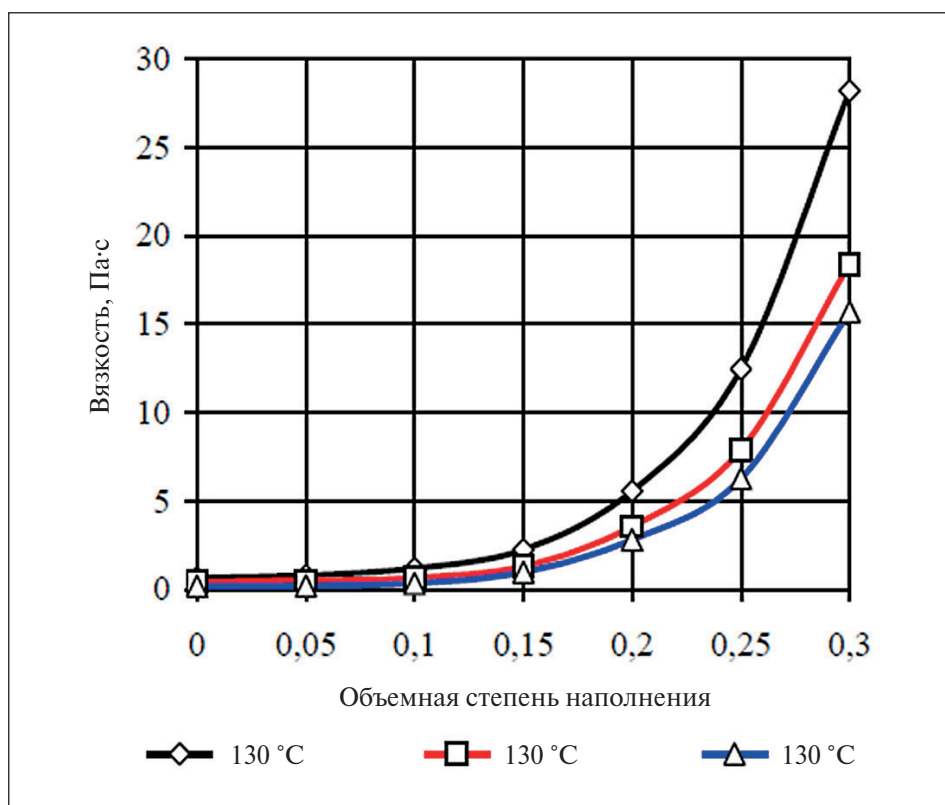


Рис. 9. Зависимость вязкости системы «битум – МП» от степени наполнения

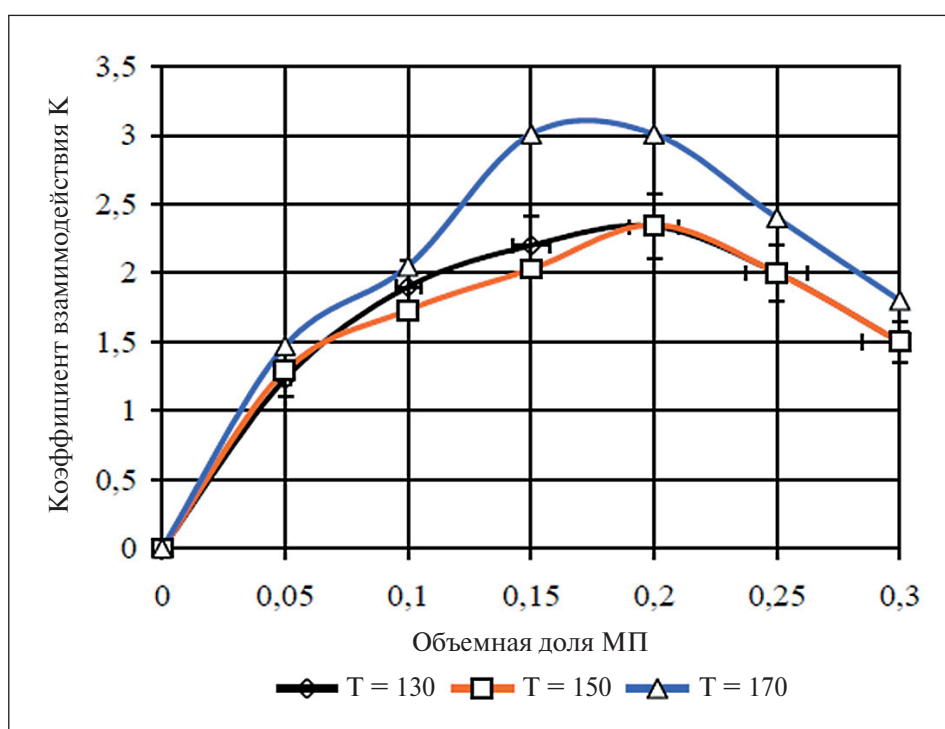


Рис. 10. Зависимость коэффициента $K_{вз}$ от степени наполнения и температуры системы «битум – МП»

подчиняется определенным закономерностям и зависит от:

- объемного распределения по размерам частиц во фракциях минерального порошка, что определяет площадь межфазной поверхности взаимодействия;
- температуры смещения и степени наполнения композиции – оптимальные условия: температура от 160 °С до 170 °С, объемная доля 0,17–0,2.

Таким образом, выбранную рецептуру АБС, которая исследовалась в работе и содержит объемную долю МП-1 на уровне 0,258, необходимо откорректировать в сторону увеличения массы битума на ~ 2,0 кг, с тем, чтобы попасть в оптимум по взаимодействию минерального порошка и битума.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании оптических исследований фракционного состава стандартной асфальтобетонной смеси определены площади межфазного взаимодействия между каменным наполнителем и битумом, согласующиеся с результатами других исследователей.

2. На основе анализа экспериментальных и теоретических исследований установлены зависимости коэффициента взаимодействия в системе «битум – минеральный порошок» от дисперсионного состава, температуры и степени наполнения.

3. Полученные результаты позволяют скорректировать состав асфальтобетонной смеси с целью повышения ее эксплуатационных характеристик.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Горельшев Н.В. *Асфальтобетон и другие битумо-минеральные материалы*. Можайск: Издательство ТЕРРА; 1995. 176 с.
2. Образцова Т.Б. Эквивалентные диаметры частиц URL: <https://sunspire.site/ru/articles/part7/> (дата обращения: 16.03.2026)
3. Горельшев Н. В. Взаимодействие битума и минерального порошка в асфальтовом бетоне. *Труды МАДИ*. 1955;(10):20–23.
4. Королев И.В., Золотарев В.А., Ступивцев В.А. *Асфальтобетонные покрытия*. Донецк: Донбасс, 1970. 162 с.
5. Столярова Н.А. *Литые органоминеральные смеси для ремонта дорожных покрытий нежесткого типа*. Дис. канд. тех. наук. Макеевка; 2009. 167 с.
6. Шиц Л.А. Суспензии. URL: <https://bigenc.ru/c/suspenzii-6dbfd0?ysclid=mmt39qo3c4877969100> (дата обращения: 16.03.2026)
7. Равичев Л.В., Беспалов А.В., Логинов В.Я. Моделирование вязкостных свойств концентрированных суспензий. *Теоретические основы химической технологии*. 2008;42(3):326–335. – EDN: ILAJDD
8. Равичев Л.В., Логинов В.Я., Беспалов А.В. Исследование вязкости суспензий сферических частиц. *Вестник СГТУ*. 2012;1(64). Выпуск 2:26–30. – EDN: PWBRDV
9. Роул А. *Основные принципы анализа размеров частиц*. Техническая аннотация, Malvern Instruments Limited; 2009. 12 с.
10. Pabst W. *Characterization of particles and particle systems*. Prague. W. Pabst, E. Gregorova. ICT Prague; 2007.
11. Иноземцев С.С., Поздняков М.К., Королев Е.В. Исследование адсорбционно-сольватного слоя битума на поверхности минерального порошка. *Вестник МГСУ*. 2012;11:159–167. – EDN: PJBGSZ
12. Бахрах Г.С. К оценке толщины адсорбционно-сольватного слоя битумов на поверхности частиц. *Коллоидный журнал*. 1969;39(1):8–12.
13. Andronov S.Yu., Ivanov A.F., Kochetkov A.V. Highway Repair Using Fiber-Containing Asphalt Concrete Mixes with Dispersed Binder. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2020;(4-5):62–67. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-62-67>
14. Andronov S.Yu., Alferov V.I., Kochetkov A.V., Vasiliev Yu.E. Uniform fiber distribution in cold asphalt mixtures with viscous microdispersed bitumen. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2020;7(1):17SATS120. <https://doi.org/10.15862/17SATS120>
15. Di Yu, Wensheng Wang, Yongchun Cheng, Yafeng Gong. Laboratory investigation on the properties of asphalt mixtures modified with double-adding admixtures and sensitivity analysis. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2016;3(5):412–424. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2016.09.002>
16. Yongchun Cheng, Di Yu, Guojin Tan, Chunfeng Zhu. Low-Temperature Performance and Damage Constitutive Model of Eco-Friendly Basalt Fiber-Diatomite-Modified Asphalt Mixture under Freeze-Thaw Cycles. *Materials*. 2018.11(11):2148. <https://doi.org/10.3390/ma11112148>

17. Clara Celauro, Filippo Praticò. Asphalt mixtures modified with basalt fibres for surface courses. *Construction and Building Materials*. 2018;170:245–253. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.058>

18. Yafeng Gong, Haipeng Bi, Chunyu Liang, Shurong Wang. Microstructure Analysis of Modified Asphalt Mixtures under Freeze-Thaw Cycles Based on CT Scanning Technology. *Applied Sciences*. 2018;8(11):2191. <https://doi.org/10.3390/app8112191>

19. Xiao Qin, Aiqin Shen, Yinchuan Guo, Zhennan Li, Zhenghua Lv Characterization of asphalt mastics reinforced with basalt fibers. *Construction and Building Materials*. 2018;159:508–516. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.012>

20. Yafeng Gong, Haipeng Bi, Zhenhong Tian, Guojin Tan. Pavement Performance Investigation of Nano-TiO₂/CaCO₃ and Basalt Fiber Composite Modified Asphalt Mixture under Freeze–Thaw Cycles. *Applied Sciences*. 2018;8(12):2581. <https://doi.org/10.3390/app8122581>

21. Yafeng Gong, Haipeng Bi, Zhenhong Tian, Guojin Tan. Pavement Performance Investigation of Nano-TiO₂/CaCO₃ and Basalt Fiber Composite Modified Asphalt Mixture under Freeze-Thaw Cycles. *Applied Sciences*. 2018;8(12):2581. <https://doi.org/10.3390/app8122581>

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Андронов Сергей Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, академик транспорта, заместитель руководителя Саратовское областное отделение Российской академии транспорта, 410015, Саратов, ул. Барнаульская, 26, к. 8, Российская Федерация, atomic08@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0009-1521-8110>

Васильев Юрий Эмануилович – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Дорожно-строительные материалы и химические технологии», Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64, Российская Федерация, vashome@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1634-0152>

Кочетков Андрей Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры «Мосты, тоннели и строительные конструкции», Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64, Российская Федерация, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614000, Пермь, Комсомольский проспект, 29, Российская Федерация, soni.81@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6523-6095>

Слепнев Павел Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Градостроительство», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация, slepnevpa@mgsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2237-4436>

Чижиков Илья Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Градостроительство», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация, ilya2@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-2212-3501>

ВКЛАД АВТОРОВ

Андронов С. Ю. – проведение экспериментальных исследований, разработка теоретической модели, составление заключения.

Васильев Ю. Э. – научное руководство, разработка теоретической модели, анализ результатов исследований.

Кочетков А. В. – разработка теоретической модели, обработка экспериментальных данных, составление заключения, научное редактирование текста статьи.

Слепнев П. А. – сбор и обработка экспериментальных данных, анализ результатов исследования, подготовка текста статьи.

Чижиков И. А. – сбор и обработка экспериментальных данных, анализ результатов исследования, подготовка текста статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 18.02.2026; одобрена после рецензирования 25.03.2026; принята к публикации 05.04.2026.