

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.7./8, 531.7 : 544.576

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-60-72

Оценка размеров частиц битумной суспензии с помощью фотосъемки и обработки данных седиментации

**Ю.Э. Васильев, Г.Ш. Малазоня, А.В. Кочетков,
А.Ф. Иванов, Д.А. Кочетков**

Юрий Эммануилович Васильев¹, Георгий Шалвович Малазоня¹, Дмитрий Андреевич Кочетков¹

¹Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Российская Федерация

dsm@madi.ru, geo.rnd1749@gmail.com, kdasoni@mail.ru

Андрей Викторович Кочетков^{2*, 3}

²ФАУ «РОСДОРНИИ», Москва, Российская Федерация

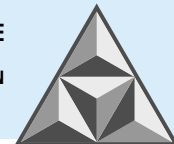
³Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация

*soni.81@mail.ru**

Александр Федорович Иванов⁴

⁴Поволжское отделение Российской академии транспорта, Саратов, Российская Федерация

IvanovAF@mgsu.ru



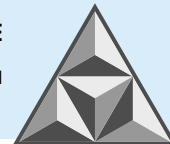
Решена задача получения технологического передела – трехкомпонентной системы «микродиспергированное минеральное зерно – микродиспергированная частица вязкого битума – вода» при последовательном дозировании компонентов сырья на асфальтобетонном заводе. Для исключения расслаивания битумной суспензии, обеспечения ее перевозки автосамосвалами, хранения в грунтовом котловане и погрузки необходимо приготавливать суспензию вязкой консистенции. Предлагается отказаться от разогрева битума в зимний период и использовать готовые материалы для дорожного строительства в холодном виде. Добавление минеральных компонентов позволит производить на российских предприятиях холодные аналоги асфальтобетонных смесей длительного хранения.

Ключевые слова: битум, суспензия, методы дисперсионного анализа, световая микроскопия, фотоседиментация, гравиметрия

Для цитирования:

Васильев Ю.Э., Малазония Г.Ш., Кочетков А.В., Иванов А.Ф., Кочетков Д.А. Оценка размеров частиц битумной суспензии с помощью фотосъемки и обработки данных седиментации // *Умные композиты в строительстве*. 2025. Т. 5, вып. 1. С. 60-72.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5863/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-60-72



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-60-72

Estimation of bitumen suspension particle size using photography and sedimentation data processing

**Yu.E. Vasiliev, G.Sh. Malazonia, A.V. Kochetkov,
A.F. Ivanov, D.A. Kochetkov**

Yury Emmanuilovich Vasil'ev¹, Georgy Shalvovich Malazoniya¹, Dmitry Andreevich Kochetkov¹

¹Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University, Moscow, Russian Federation
dsm@madi.ru, geo.rnd1749@gmail.com, kdasoni@mail.ru

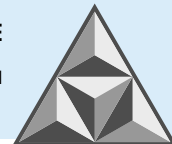
Andrey Viktorovich Kochetkov^{2*, 3}

²FAI "ROSDORNII", Moscow, Russian Federation

³Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation
*soni.81@mail.ru**

Aleksandr Fedorovich Ivanov⁴

⁴Volga Region Branch of the Russian Academy of Transport, Saratov, Russian Federation
IvanovAF@mgsu.ru



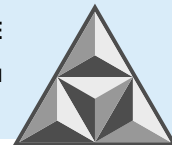
The paper solves the task of obtaining the technological conversion - three-component system 'microdispersed mineral grain - microdispersed particle of viscous bitumen - water' at consecutive dosing of raw material components at the asphalt-concrete plant. It is necessary to prepare the bitumen suspension of viscous consistency to avoid delamination of bitumen slurry, to ensure its transportation by dump trucks, storage in the excavation and loading. The authors propose to refuse to heat bitumen in winter and to use ready-made materials for road construction in cold form. The addition of mineral components will make it possible to produce cold analogues of long-term storage asphalt concrete mixtures at Russian enterprises.

Keywords: bitumen, suspension, dispersion analysis methods, light microscopy, photosedimentation, gravimetry

For citation:

Vasiliev Yu.E., Malazonia G.Sh., Kochetkov A.V., Ivanov A.F., Kochetkov D.A. Estimation of bitumen suspension particle size using photography and sedimentation data processing // *Smart Composite in Construction*. 2025. Vol. 6, Iss. 1. P. 60-72. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5863/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-60-72



ВВЕДЕНИЕ

В истории отечественного дорожного хозяйства остался малоизвестным феноменальный результат, когда в 1989 г. в Саратовской области было построено 750 км новых автомобильных дорог общего пользования в условиях острого дефицита фондируемых дорожно-строительных материалов. Это было достигнуто за счет применения технологии круглогодичного строительства, при этом даже асфальтобетонные слои устраивались при отрицательных температурах.

«В период с 1975 года до декабря 1991 года дорожные работы в Саратовской области обеспечивались структурой областного исполнительного комитета Администрации Саратовской области – Саратовским дорожным ремонтно-строительным управлением ПРСО «Саратовавтодор» под руководством Нолия Петровича Самотеева. В этот период была построена опорная сеть автомобильных дорог, соединены с областным центром все районы области. Общая протяженность построенных и реконструированных в это период автомобильных дорог составила порядка 8.5 тыс. километров»¹.

Одним из эффективных решений, обеспечивших возможность круглогодичного строительства дорог, явилось применение так называемой «саратовской» технологии влажных холодных асфальтобетонных смесей на основе диспергированного вязкого битума. Эта технология была разработана проф. Н.А. Горнаевым в Дорожной исследовательской лаборатории Министерства автомобильных дорог РСФСР при Саратовском политехническом институте.

Холодные смеси производили с использованием твердых эмульгаторов на асфальтобетонных заводах г. Саратова (без выделения вредных газообразных веществ), а также на всей территории Саратовской и Самарской (тогда Куйбышевской) областей. Их транспортировали речными судами летом и круглогодично – по железной дороге. Для перевозки по автомобильным дорогам применяли не только самосвалы, но и бортовой грузовой транспорт. Дорожные строительные материалы складировали в буртах и на складах.

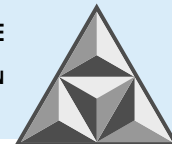
Такая технология отличалась от горячей применением существующих рецептур минеральной части в холодном состоянии, в которую добавлялась вода до достижения вязкого тиксотропного состояния и постадийного связанного дозирования горячего вязкого битума. Смесей производили на типовых асфальтобетонных заводах, которые оснащались системами подачи воды.

В качестве твердого эмульгатора применяли различные минеральные порошки, в том числе – пыль асфальтобетонного завода, известь и другие аналоги. Выпускались различные составы мелкозернистого и крупнозернистого асфальтобетона, литые асфальтобетоны, ремонтные холодные смеси. Технология была использована в регионах с устойчивым теплым летним климатом в Оренбургской, Самарской и Волгоградской областях, а также в Крыму и Казахстане. В Саратове такие материалы использовали при устройстве шестиполосных магистральных дорог.

Постановка прикладной задачи

В дорожном строительстве наблюдается устойчивая тенденция поиска асфальтовых материалов и полуфабрикатов, которые при температуре воздуха могут длительное время сохранять технологические характеристики, а после укладки и уплотнения (формирования

¹ https://sarobldor.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=9&Itemid=3



каркаса укаткой) – приобретать новые свойства. Такие материалы принято называть холодными асфальтобетонами или органоминеральными материалами. Особенностью материалов с дисперсным битумом является растянутость во времени процессов формирования структуры и высокая сопротивляемость внешним воздействиям.

Диспергирование органического вяжущего является основным процессом структурообразования на стадии приготовления асфальтовых смесей с дисперсным битумом. Критерием оптимизации состава и технологии приготовления асфальтовых материалов с битумом следует считать дисперсность, которая влияет на протекание процессов структурообразования в последующих технологических переделах и в итоге – на свойства дорожной одежды.

Поставлена задача получения первого технологического передела (полуфабриката), обладающего отличительными признаками вышеуказанных смесей, производимых по саратовской технологии. Такой полуфабрикат назван полидисперсной битумной суспензией (ПБС) – трехкомпонентной системой «микродиспергированное минеральное зерно – микродиспергированная частица вязкого битума – вода».

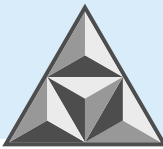
Фактически авторами настоящей работы разработана технология получения и применения устойчивых (квазиустойчивых) битумных суспензий, разнообразных по составу и свойствам. Это подтверждается рядом отечественных публикаций [1-4]. Российские исследования, достаточно полно отражающие научно-технический уровень разработки темы, приведены в [5-9]. В качестве нормативных документов использованы ГОСТ 22662-77 «Порошки металлические. Методы седиментационного анализа» и ГОСТ 23402-78 «Порошки металлические. Микроскопический метод определения размеров частиц». Зарубежные аналоги представлены в [10-15]. Приведенные в них данные были использованы при разработке методических вопросов, решаемых в рамках представленного исследования.

Близким аналогом предлагаемого технического решения являются строительные пасты для заделки щелей в деревянных полах, состоящие из микрорамора, пигмента, вяжущего (акрил) и воды. Существенным отличием предлагаемой технологии является последовательное дозирование применяемых компонентов (вяжущего, твердого эмульгатора, воды).

Основной идеей отечественной научной школы разработки составов при производстве асфальтобетонных смесей является обволакивание каменного зерна (щебня, песка, отсева, частиц минерального порошка) пленкой вяжущего (битумом, полимербитумом).

В данном же случае применяется альтернативная технология: частица диспергированного вязкого битума опудрена минеральным порошком и помещена в водную среду. Добавление воды препятствует слипанию частиц вяжущего компонента и каменного материала. В летний период под действием тепла и транспортной нагрузки вяжущее переходит в пленочное состояние. Материал для дорожного строительства приобретает особые свойства, например, к нему не применяются требования по морозостойкости.

Идея полуфабриката в настоящей статье возникла при анализе работы [1] и паспорта научной специальности 2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей, а конкретно – п. 16. Вопросы организации производства, механизации и автоматизации технологических процессов производственных предприятий, обеспечивающих строительство, реконструкцию и эксплуатацию транспортных сооружений материалами, полуфабрикатами и изделиями. В указанном пункте паспорта специальности отдельно выделен термин «полуфабрикат», который по смыслу отличается от терминов «материалы» и «изделия».



Добавление в данный полуфабрикат других веществ в рамках заданной рецептуры без их разогрева позволяет получать холодные влажные аналоги асфальтобетонных смесей типа А, Б, В, Г, Д, а также литые асфальтобетоны, эмульсионно-минеральные и ремонтные смеси, мастики, вяжущие для асфальтогранулята, пропитки и материалы для ремонта крыш [2-4].

А.Ф. Ивановым [4] экспериментально установлен срок хранения специально отобранной мелкофракционной составляющей холодных асфальтобетонных смесей на основе диспергированного вязкого битума в условиях ограниченного доступа воздуха. Он составляет более 40 лет, что является выигранным по сравнению со сроком хранения битумной эмульсии (≤ 1 мес.). Разведенная водой смесь может находиться в полусухом (рыхлом, рис. 1), влажном и жидком состоянии. Она хранится в буртах или в закрытых складах в мешках.

Находясь в пластичном состоянии, битумная суспензия под воздействием внешних сил обладает способностью деформироваться без разрыва сплошности и сохранять форму после прекращения воздействия.

При этом остается открытым вопрос технического нормирования и регулирования данного полуфабриката. Одним из важных показателей является определение количества вяжущего в нем, а также седиментационная устойчивость в зависимости от кислотности-щелочности и морфологии применяемого каменного материала.

Для совершенствования предложенной технологии необходимо установить взаимосвязь между дисперсностью композиций и их физико-химическими свойствами. Для этого целесообразно использовать экспериментальную методику оценки размеров частиц, разработанную в настоящем исследовании

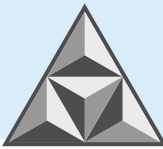
Твердые эмульгаторы из осадочных пород, имеющие большую удельную площадь поверхности, более устойчивы к изменению физико-химических свойств по сравнению с твердыми эмульгаторами из изверженных пород. Поверхность проезжей части после распределения разжиженной суспензии автобетоносмесителем в виде тонкого обеспыливающего слоя представлена на рис. 2.



Рис. 1. Битумная суспензия в рыхлом состоянии (фото авторов)
Fig. 1. Bitumen suspension in a loose state (photo by the authors)



Рис. 2. Проезжая часть после распределения жидкой суспензии в виде тонкого обеспыливающего слоя
Fig. 2. Road surface after spreading the suspension slurry as a thin dedusting layer



Со временем происходит изменение однородности состава смеси. Наблюдается разделение на зоны с повышенным содержанием диспергированного битума («черная вода») и светлые зоны с высоким содержанием водной взвеси минерального порошка.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Цель исследования – разработка простого и технически доступного метода анализа размеров частиц битумной суспензии с помощью цифровой фотосъемки и обработки изображений процесса седиментации.

Состав битумной суспензии, мас%:

- известняковый минеральный порошок – 33;
- вода техническая – 34;
- битум марки БНД 90/130 – 33.

Битумную суспензию готовили следующим образом. Твердый эмульгатор в виде известнякового минерального порошка с температурой 18°C дозировали и подавали в смеситель (200 кг), куда при непрерывном перемешивании вводили воду (80 л) с температурой 18°C до получения сметанообразной консистенции, по внешнему виду похожей на цементный раствор, затем подавали битум (40 кг) с температурой 155°C.

В процессе перемешивания битума с суспензией твердого эмульгатора смесь распадалась на частицы сферической формы со средним диаметром 1 мкм. В аппарат добавляли 20 л воды и производили перемешивание в течение 30 с, далее подавали битум (40 кг) и вновь смешивали 30 с. Для разведения суспензии добавляли 40 л воды, после чего вводили 40 кг битума и продолжали перемешивание в течение 30 с.

Готовую битумную суспензию выгружали в ковш подъемника, а затем – в металлическую емкость, размещенную в кузове автосамосвала, и доставляли к месту производства работ.

Приготовленная битумная смесь, похожая на пластилин темно-серого цвета, легко разбавлялась холодной водой до жидкой консистенции; при этом битумные частицы были неразличимы невооруженным глазом.

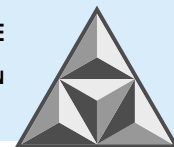
Визуально в суспензии содержалось избыточное количество воды. Суспензия быстро расслаивалась с самопроизвольным отделением наиболее тонкодисперсной части битума и минерального порошка в виде жидкости черного цвета.

Для оценки размера частиц битумной суспензии использовали методическую базу [5] и ГОСТ 23402–78, вооружившись портативным цифровым микроскопом DM 200-2 (Китайская Народная Республика) с увеличением $\times 200$ (рис. 3).



Рис. 3. Цифровой микроскоп DM 200-2

Fig. 3. DM 200-2 Digital Microscope



Системные требования для установки программного обеспечения цифрового микроскопа: ОС Windows XP SP2 / Vista / Windows 7 / Mac OS; процессор: Pentium IV 1.0G, Celeron, AMD Athlon; CD-ROM; свободный USB-порт; 512 MB RAM; 100 MB свободного места на диске; видеокарта: 16-bit.

Для получения достоверных результатов измерения повторяли 10 раз и подсчитывали средние значения размеров частиц.

Средний диаметр частиц битума, определяемый с помощью указанного цифрового микроскопа с измерительной шкалой, составлял около 1 мкм.

Авторами подобран состав, пригодный для длительного хранения в герметичной таре с сохранением технологических и функциональных свойств. Готовую битумную суспензию расфасовывали в мешки массой 30-40 кг из синтетической ткани, внутри которых дополнительно помещали также мешок из полиэтилена (для снижения потери влажности смеси), и отправляли на склад.

Битумную суспензию впоследствии применяли для различных целей (ремонт трещин на асфальтобетонном покрытии и кровли на зданиях, приготовление материалов для ремонта выбоин на асфальтобетонных покрытиях автомобильных дорог и городских улиц).

В сертифицированную многофункциональную лабораторию ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет» суспензию доставляли в стеклянных герметичных емкостях и мешках. Битумная суспензия, которая находилась в мешках, из-за незначительного повреждения тары частично потеряла влажность, однако при разведении водой и перемешивании она переходила в требуемое текучее состояние.

Для испытаний применяли секундомер и линейку. Образцы суспензии из стеклянной герметичной емкости и мешка разводили водой и помещали в стеклянные цилиндры диаметром 20 мм и высотой 70 мм (на фото, размещенном слева, приведен цилиндр с разведенной суспензией из стеклянной герметичной емкости).

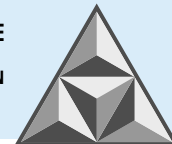
Приготовленную суспензию тщательно перемешивали в течение 2-3 мин стеклянной палочкой до тех пор, пока не устанавливалось равномерное распределение частиц по всему объему. После встряхивания производили фотографирование образцов суспензий с использованием секундомера (цена деления 0.2 с) и линейки (цена деления 1.0 мм) спустя различное время от начала гомогенизации. Секундомер позволяет установить время осаждения частиц суспензии, а линейка – зафиксировать толщину слоя осадка с различными цветовыми оттенками и момент завершения процесса осаждения частиц битумной суспензии.

Состояние суспензий в разведенном состоянии непосредственно после гомогенизации и фотофиксации процесса седиментации спустя 39 и 3062 с от начала процесса представлены на рис. 4.



Рис. 4. Вид суспензий после гомогенизации встряхиванием и фотофиксации процесса седиментации спустя 39 (а) и 3062 с (б) от его начала

Fig. 4. View of suspensions after homogenization by shaking and photo fixation of the sedimentation process from the beginning: a – 39 seconds; b – 3062 seconds



Отдельно отметим, что вид суспензий на рис. 4 относится к одной экспериментальной серии. Принципиальное отличие проб, приведенных на рис. 4, а и 4, б, заключается во времени проявления контрастных границ между темным и светлым фоном для битумных суспензий, приготовленных из герметичной стеклянной емкости и мешка. Если для осажденной суспензии из мешка осадок был одного цвета (черного), то изображение осажденной битумной суспензии из герметичной стеклянной емкости через 3062 с (рис. 4, б) имеет два участка разного цвета (серого в нижней части и черного сверху).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ фотографий показывает, что частично обезвоженная битумная суспензия, хранившаяся в негерметичной таре (цилиндр на рисунке справа) после разведения водой осаждается в основном в течение первой минуты. Это можно объяснить тем, что в процессе длительного хранения (5 лет) произошло образование агрегатов из битумных и крупных минеральных частиц. Такой вывод базируется на том, что на дне цилиндра отсутствует слой осадка из минерального порошка белого цвета.

На поверхности осадка наблюдается тонкий слой частиц минерального порошка белого цвета, а также дисперсная взвесь. Эти наблюдения показывают, что не весь объем тонкодисперсных минеральных частиц задействован в стабилизации на стадии приготовления суспензии. Поэтому, вероятно, можно получать суспензии и с повышенным содержанием битума.

Более детальные визуальные и инструментальные исследования проводились для битумной суспензии из герметичной тары (на фотографии – цилиндр, расположенный слева).

Установлено, что процесс седиментации практически завершается спустя $\tau = 3062$ с от его начала; при этом образуется столб осадка из частиц битумной суспензии высотой 17 мм (100% высоты).

Для определения фактического размера битумных частиц из различных горизонтов столба осаждения с помощью пипетки отбирали пробы и с помощью цифрового микроскопа определяли их средний диаметр.

На рис. 5 приведены результаты анализа яркости черно-белых цифровых изображений столба седиментации частиц битумной суспензии. Как видно из рис. 5, яркость изображений возрастает в процессе седиментации частиц по глубине осадка в суспензии.

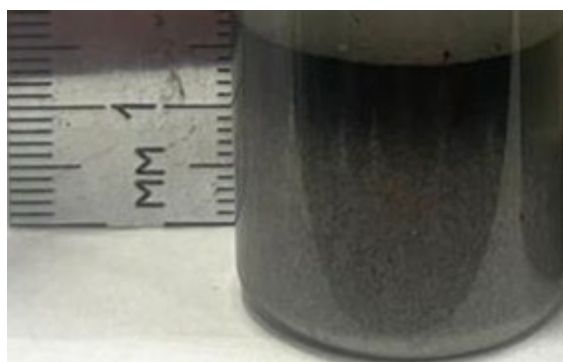
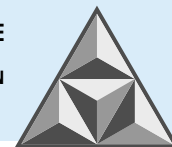


Рис. 5. Изменение яркости и контрастности изображения столба осажденных частиц суспензии
Fig. 5. Changing the brightness and contrast of the image of the column of precipitated suspension particles

Видно, что на осажденном участке изображение в верхней части более темное, тогда как внизу, в придонной части, оно гораздо светлее. Имеется две контрастные границы, при этом верхняя – более резкая (резкость – третья производная). Авторы данного исследования более



темный участок назвали «битумная вода», или «битумная взвесь». При этом седиментационная устойчивость сохранялась на протяжении всего периода наблюдения. По результатам наблюдений сформулированы рекомендации по выбору увеличения микроскопа в зависимости от размеров исследуемого объекта (в миллиметрах). Необходимые соотношения для цифрового аппарата представлены в табл. 1.

Таблица 1. Соотношение видимой области и увеличения для цифрового микроскопа

Table 1. Visible Area to Magnification Ratio for Digital Microscope

Увеличение	×10	×20	×30	×50	×100	×150	×200
Видимая область, мм	50 × 38	25 × 19	17 × 13	10 × 7.5	5 × 3.8	3.3 × 2.5	2.5 × 1.9

Авторами разработан программный модуль анализа светотехнических показателей (контрастности, светлоты, резкости) на основе расчета отношения яркостей выбранных участков. При отображении фотографии на экране монитора каждая точка будет представлена в формате RGB. При фотографировании используется эталон. Статистическая обработка проводится с помощью программного обеспечения Microsoft Excel. Программный модуль подтверждает возможность определения контрастности границ между темным и светлым участком фотоизображения осажденной битумной суспензии и завершения процесса.

Установлено, что на поверхности осадка визуальное выраженного темного цвета (на уровне высоты 100%) средний диаметр битумных частиц составляет 0.4 мкм, в середине осадка (на уровне высоты 75%) он равен 12.0 мкм, а в нижней части столба осадка (на уровне высоты 50%) – достигает уже 110.0 мкм.

В качестве примера практической реализации методики на рис. 6 приводится снятая фотография битумной суспензии, разведенной водой на асфальтобетонном заводе в Кувандыкском городском округе (Оренбургская обл.).

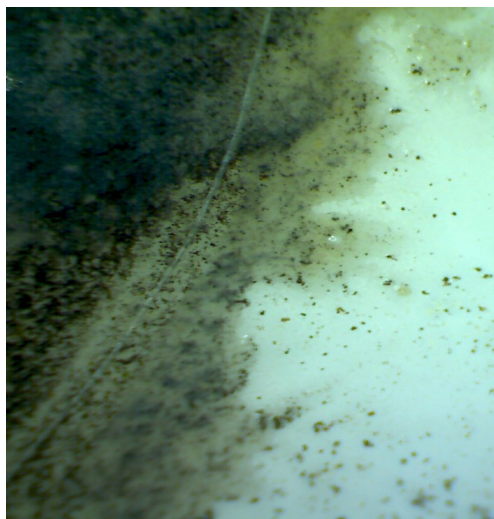
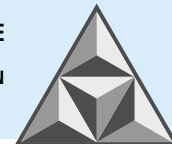


Рис. 6. Фотография заводской битумной суспензии после разведения ее водой

Fig. 6. Photograph of a factory bitumen suspension after dilution with water

Для сравнительной оценки размера битумных капель слева помещен волос человека (белая параболическая линия на рис. 6). Хорошо видно, что размер битумных частиц меньше диаметра волоса (последний легко замеряется микрометром). Также отмечается, что в данной полидисперсной системе наблюдается несколько фракций частиц, различающихся по размеру.



ВЫВОДЫ

1. Показана возможность появления в отечественном дорожном хозяйстве новой технологии обращения с битумными вяжущими при производстве последних, их хранении, транспортировании и применении в виде полидисперсной суспензии, а также разработки методологических основ их нормирования и контроля качества.

2. Результаты предлагается рассматривать как первый этап реализации программы исследований в области проектирования и строительства дорог с использованием современных цифровых методов обработки экспериментальных данных, что позволит в дальнейшем усовершенствовать предлагаемые технологические решения.

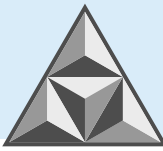
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Игнатъев А.А.** Функционально устойчивые дорожные гранулированные смеси (пределы) длительного хранения: спец. 2.1.8. Автореф. дисс... д-ра техн. наук. ФАУ «РОСДОРНИИ», Москва, 2024. DOI: 10.18720/SPBPU/2/r24-18.
2. Патент РФ № 2662493 Способ получения битумной эмульсии и битумная эмульсия. А.В. Кочетков. Оpubл. 26.07.2018.
3. **Кочетков А.В.** Битумная суспензия на твердом эмульгаторе // Транспортные сооружения. 2018. №4. [Электронный ресурс]. URL: <https://t-s.today/PDF/15SATS418.pdf> (дата обращения 10.01.2025). DOI: 10.15862/15SATS418.
4. **Кочетков А.В., Андронов С.Ю., Иванов А.Ф. [и др.]**. Битумная суспензия: моногр.; под ред. Ю.Э. Васильева, Н.Е. Кокодеевой. Саратов: Саратовский гос. техн. ун-т им. Ю.А. Гагарина, 2019. 192 с.
5. **Романовский С.И.** Физическая седиментология. Л.: Недра, 1988. 240 с.
6. **Фролов Ю.Г.** Курс коллоидной химии. М.: Альянс, 2004. 424 с.
7. **Шапиро Л., Стокман Дж.** Компьютерное зрение. М.: Бином, 2006. 762 с.
8. **Кэлби С.** Цифровая фотография. М.: Вильямс, 2011. В 2 т. Т. 1. 224 с.; Т. 2. 258 с.
9. **Сазановец М.А., Игнатенко А.В.** Метод анализа скорости седиментации частиц в водных средах // Труды БГТУ. 2013. № 4: Химия, технология орган. веществ и биотехнология. С. 48-50.
10. **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*. 2016. DOI: 10.1016/j.jtte.2016.09.002.
11. **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 Article (PDF Available) // *Materials* 11 (11):2148, October 2018. DOI: 10.3390/ma11112148.
12. **Celauro Clara, Praticò Filippo.** Asphalt mixtures modified with basalt fibres for surface courses // *Construction and Building Materials* 170:245-253, May 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.058
13. **Yafeng Gong, Haipeng Bi, Chunyu Liang.** Shurong Wang Microstructure Analysis of Modified Asphalt Mixtures under Freeze-Thaw Cycles Based on CT Scanning Technology // *Appl. Sci.* 8 (11):2191, November 2018 with 32 Reads. DOI: 10.3390/app8112191.
14. **Xiao Qin, Aiqin Shen, Yinchuan Guo, Zhennan Li.** Characterization of asphalt mastics reinforced with basalt fibers // *Construction and Building Materials* 159:508-516·January 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.012.
15. **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 // *Appl. Sciences* 8 (12):2581, December 2018. DOI: 10.3390/app8122581.

Поступила в редакцию 21.01.2025

Одобрена после рецензирования 17.02.2025

Принята к опубликованию 14.03.2025



REFERENCES

1. **Ignatyev, A.A.** (2024), Functionally stable road granulated mixtures (redesigns) of long-term storage: Author's thesis... Dr. Tech. Sci. FAI 'ROSDORNII', Moscow, Russia. DOI 10.18720/SPBPU/2/r24-18 (in Russian).
2. **Kochetkov, A.V.** (2018), Method of obtaining bitumen emulsion and bitumen emulsion. Pat. RU No. 2662493, Russia.
3. **Kochetkov, A.V.** (2018), Bitumen suspension on solid emulsifier, *Transport Structures*, no. 4. Available at: <https://t-s.today/PDF/15SATS418.pdf>. DOI: 10.15862/15SATS418 (in Russian).
4. **Kochetkov, A.V., Andronov, S.Yu., Ivanov, A.F. et al.** (2019), *Bitumnaya suspenziya: monogr. [Bitumen suspension: a monograph]*, edited by Yu.E. Vasiliev, N.E. Kokodeeva, Saratov: Saratov State Technological University named after Yu.A. Gagarin, 192 p. (In Russian).
5. **Romanovsky, S.I.** (1988), *Fizicheskaya sedimentologiya [Physical sedimentology]*, L.: Nedra, 240 p. (in Russian)
6. **Frolov, Yu.G.** (2004), *Kurs kolloidnoj khimii [Course of colloid chemistry]*, Moscow: Alliance, 424 p. (in Russian).
7. **Shapiro, L. and Stockman, J.** (2006), *Komp'yuternoe zrenie [Computer Vision]*, Moscow: Binom, 762 p. (in Russian).
8. **Calby, S.** (2011). *Tsifrovaya fotografiya [Digital Photography]*, M.: Williams, In 2 vols, vol. 1, 224 p.; vol. 2, 258 p.
9. **Sazanovets, M.A. and Ignatenko, A.V.** (2013), Method for analysing the sedimentation rate of particles in aqueous media, *Proceedings of BSTU: Chemistry, Technology of Organic Substances and Biotechnology*, no. 4, pp. 48-50 (in Russian).
10. **Di, Yu, Wensheng, W., Yongchun, Ch. and Yafeng, G.** (2016), Laboratory investigation on the properties of asphalt mixtures modified with double-adding admixtures and sensitivity analysis, *Journ. Traffic and Transport. Eng.* DOI: 10.1016/j.jtte.2016.09.002.
11. **Yongchun, Cheng, Di, Yu, Guojin, Tan and Chunfeng, Zhu** (2018), Low-Temperature Performance and Damage Constitutive Model of Eco-Friendly Basalt Fiber – Diatomite – Modified Asphalt Mixture under Freeze-Thaw Cycles Article (PDF Available), *Materials* 11 (11):2148, October 2018. DOI: 10.3390/ma11112148.
12. **Celauro, C., Praticò, F.** (2018), Asphalt mixtures modified with basalt fibres for surface courses, *Construction and Building Materials*, 170:245-253. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.058.
13. **Yafeng, Gong, Haipeng, Bi, and Chunyu, Liang** (2018), Shurong Wang Microstructure Analysis of Modified Asphalt Mixtures under Freeze-Thaw Cycles Based on CT Scanning Technology, *Appl. Sci.*, 8 (11):2191, November 2018. DOI: 10.3390/app8112191.
14. **Xiao, Q., Aiqin, Sh., Yinchuan, G. and Zhennan, Li** (2018), Characterization of asphalt mastics reinforced with basalt fibers, *Construction and Building Materials* 159:508-516. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.012.
15. **Yafeng, Gong, Haipeng, Bi, Zhenhong, Tian and Guojin, Tan** (2018), Pavement Performance Investigation of Nano-TiO₂/CaCO₃ and Basalt Fiber Composite Modified Asphalt Mixture under Freeze-Thaw Cycles, *Appl. Sci.*, 8 (12):2581, December 2018. DOI: 10.3390/app8122581.

Received 21.01.2025

Approved 17.02.2025

Accepted 14.03.2025