

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2024, Том 11, № 2 / 2024, Vol. 11, Iss. 2 <https://t-s.today/issue-2-2024.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/15SATS224.pdf>

DOI: 10.15862/15SATS224 (<https://doi.org/10.15862/15SATS224>)

2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки)

УДК 691.168

Структурообразование в асфальтобетоне при использовании минеральных порошков с высокой удельной поверхностью

^{1, 2}Пугин К.Г., ²Яконцева О.В., ^{1, 2}Тюрюханов К.Ю.

¹ФГБОУ ВО «Пермский государственный
аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова», Пермь, Россия

²ФГБОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия

Автор, ответственный за переписку: Пугин Константин Георгиевич, e-mail: 123zzz@rambler.ru

Аннотация. Увеличение транспортной нагрузки на конструкции автомобильных дорог требуют разработки новых, эффективных, устойчивых во времени материалов для устройства покрытий автомобильных дорог. В настоящее время для устройства покрытий используют асфальтобетон. Разработка новых составов асфальтобетонов возможна на основе анализа структурообразующих процессов, понимания на каких условиях будет происходить повышение физико-механических характеристик. Авторами разработана теория взаимодействия минеральных порошков с высокой удельной поверхностью с битумом.

Установлено, что капилляры поверхностного слоя на зернах минерального порошка способны создать избирательную абсорбцию масел из битума, что позволит создать более прочные пленки асфальтенов и снизить скорость термического старения битума за счет купирования масел в поверхностном слое минеральных зерен. В статье представлены результаты

исследования структуры поверхности хризотил-асбеста. Методом синхронного термического анализа с совместным использованием термогравиметрии получены данные об термической стабильности битума и асфальтобетона. На примере волокон хризотил-асбеста, имеющих высокую удельную поверхность показано, что на участке изменения температуры от 35 до 400°C потеря массы образца битума с волокнами хризотил-асбеста в 2,8 раза меньше. В статье показано, что волокна хризотил-асбеста создают условия для сохранения масел битума в структуре асфальтобетона. Регулирующая способность основана на избирательной фильтрации (абсорбции) поверхностным слоем минеральных зерен масел битума.

Ключевые слова: асфальтобетон; битум; минеральный порошок; структурообразование; асфальтены; масла битума; удельная поверхность; хризотил-асбест; покрытие

Structure formation in asphalt concrete when using mineral dust with high specific surface area

^{1,2}Konstantin G. Pugin, ²Olga V. Yakontseva, ^{1,2}Kirill Yu. Tyuryukhanov

¹Perm State Agrarian-Technological University
named after Academician D.N. Pryanishnikov, Perm, Russia
²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Corresponding author: Konstantin G. Pugin, e-mail: 123zzz@rambler.ru

Abstract. The increase of transport load on motorway structures requires the development of new, effective, time-stable materials for the arrangement of motorway pavements. Currently, asphalt concrete is used for pavements. Development of new asphalt concrete compositions is possible based on the analysis of structure-forming processes, understanding on what conditions the increase of physical and mechanical characteristics will occur. The authors have developed a theory of mineral dust interaction with high specific surface area with bitumen.

It is established that surface layer capillaries on mineral dust grains are capable to create selective oils absorption from bitumen that will allow to create more durable asphaltenes films and to reduce thermal ageing speed of bitumen at the expense of oils cupping in a surface layer of mineral dust. The paper presents the study results of the

chrysotile-asbestos surface structure. The data on thermal stability of bitumen and asphalt concrete were obtained by the simultaneous thermal analysis method with joint use of thermogravimetric. On the example of chrysotile-asbestos fibres having high specific surface area it is shown that at the temperature change section from 35 to 400°C the mass loss of bitumen sample with chrysotile-asbestos fibres is 2,8 times less. The paper shows that chrysotile-asbestos fibres create conditions for bitumen oils preservation in asphalt concrete structure. The retention capacity is based on selective filtration (absorption) by the surface layer of mineral grains of bitumen oils.

Keywords: asphalt concrete; bitumen; mineral dust; structure formation; asphaltenes; bitumen oils; specific surface; chrysotile-asbestos; coating

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

В настоящее время одним из популярных асфальтобетонов является щебеночно-мастичный асфальтобетон (ЩМА), который имеет повышенную устойчивость к колееобразованию, может воспринимать высокие внешние нагрузки от транспорта. Покрытие из ЩМА имеют меньшую скорость накопления пластических деформаций, большую устойчивость к деформациям при отрицательных температурах, трещиностойкость, высокие показатели водоустойчивости и морозостойкости обеспечиваются за счет увеличенного количества битума и увеличенного содержания щебня. Это позволяет ЩМА создавать структуру отличную от асфальтобетонов типа А, Б и формирует иное взаимодействие между компонентами асфальтобетонной смеси. Повышенное содержание битума (до 8 %) и минерального порошка (до 20 %) обеспечивают низкую пористость и высокие показатели водостойкости и морозостойкости. Производство смесей ЩМА особенно наглядно демонстрирует, что мелкодисперсный заполнитель выступает не только в качестве минерального заполнителя формируя более плотную упаковку структуры асфальтобетона заполняя микропоры между частицами песка, а также выполняет функцию регулятора подвижности битума переводя его в пленочное состояние [1–3].

Большинство разработанных теорий структурообразования в асфальтобетонах недостаточно точно описывают процессы, которые происходят на границе битум-мелкодисперсный заполнитель. Как правило зерна минерального порошка представляются в виде частиц округлой формы с ровной поверхностью. Согласно ГОСТ Р 52129-2003 для минерального порошка установлены следующие основные показатели: зерновой состав; пористость; набухание; водостойкость; битумоемкость; влажность [4; 5]. Если использовать основную теорию структурообразования, согласно которой для получения высоких эксплуатационных показателей асфальтобетона битум необходимо перевести в пленочное состояние, наибольшую значимость имеет показатель — зерновой состав. В этой связи при проектировании асфальтобетонной смеси необходимо соблюсти баланс объема битума и площадь зерен минерального остова и минерального порошка. Недостаток битума в асфальтобетонной смеси приведет к образованию локальных площадей на зернах без битумной пленки, что приведет к нарушению целостности слоя асфальтобетона. Избыток битума сформирует области в межзерновом пространстве минерального каркаса со свободным (не пленочным) битумом, что снижает показатели сдвигоустойчивости и повышает пластические деформации.

Однако ряд исследователей в своих трудах отмечают, что на свойства асфальтового вяжущего влияет не только гранулометрический состав, а также и удельная поверхность, которая может определяться пористостью, шероховатостью или слоистостью поверхностных слоев минеральных зерен. В этой связи представляет интерес изучить более подробно как использование минерального порошка с высокой удельной поверхностью влияет на эксплуатационные свойства асфальтобетона.

Сахаровым П.В., Короткевичем Н.Н., Рыбьевым И.А. был предложен механизм взаимодействия битума с минеральным порошком. Ими было установлено, что при смешивании битума с минеральным порошком образуется вторичная коагуляционная структура в результате перехода свободного битума в сольватированное и иммобилизационное состояние. Минимальная толщина битумной пленки будет определяться в первую очередь углом смачивания, который будет максимальным у асфальтенов [6–9].

На основе теории битумных (композиционных) материалов, согласно которой в формировании структуры композита большая роль отводится поверхности раздела фаз и переходному слою, который обладает особыми свойствами, при этом именно фазовое состояние данных слоев определяет и физико-механические свойства всего композита в целом.

Производя анализ представленных выше исследований структурообразующих процессов, можно сделать вывод, что при рассмотрении взаимодействия минерального заполнителя и битума битум представляется однокомпонентной жидкостью. Мелкодисперсные минеральные зерна по своей форме представляются шарообразными. Структура поверхности зерен как правила не учитывается. Для рассмотрения взаимодействия между мелкодисперсными минеральными материалами (минеральным порошком) берется во внимание гранулометрический состав порошка. Увеличение вязкости асфальтового вяжущего (смесь битума с минеральным порошком) при увеличении количества частиц в единице объема объясняется переходом битума из объёмного состояния (свойства жидкости) в пленочное.

Однако необходимо указать на то, что битум — это многокомпонентная система, которая представляет собой нефтяные дисперсные системы, в которых дисперсной фазой являются ассоциаты асфальтенов и смол, а дисперсионной средой — раствор парафино-нафтенных и ароматических углеводородов (масел). По объему, вышеуказанные составляющие части битума составляют следующий состав: смолы — 20–40 %; нефтяные масла — 30–60 %; асфальтены — 10–40 %. Если рассматривать битум как многокомпонентную жидкость, то простое

представление о переходе битума в пленочное состояние не очень состоятельно.

Более полно структура взаимодействия битума и минеральных частиц представлена в работах Королева И.В. Им предложено, что приграничный слой битума у минеральной частицы, изменяет свою структуру вследствие поверхностных сил минерального материала.

Высокомолекулярные соединения битума, проявляя «эстафетное действие», образуют цепочки, перпендикулярные к поверхности минеральной частицы. Величина данного слоя составляет несколько микрометров. Далее битум приобретает объемные свойства [10–14].

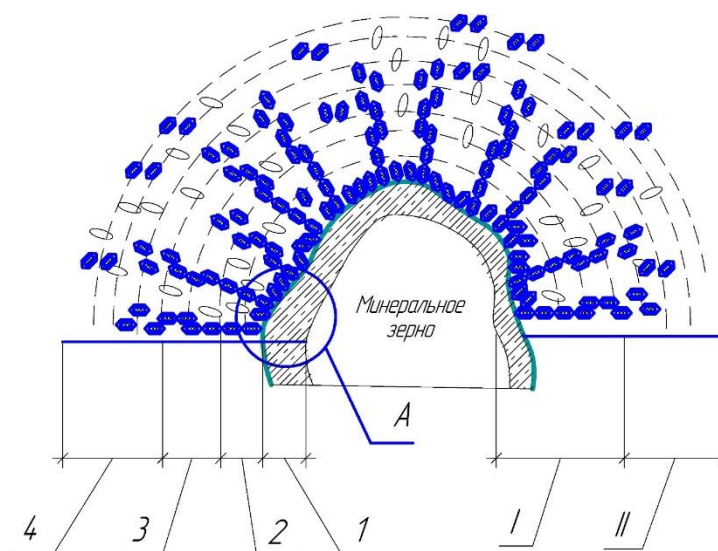
В ориентированном слое битума выделяется три зоны с характерными структурой и физико-механическими свойствами: твердообразная; структурированная; диффузная. Твердообразная зона, граничащая с поверхностью минерального материала, в основном представлена адсорбционным слоем [15–17].

При таком подходе рассмотрения взаимодействий битума и минеральных материалов не берется во внимание что поверхностный слой минерального зерна способен удерживать в своей структуре масла, которые обеспечивают эластичность битума и определяют скорость старения асфальтобетона. При термическом старении асфальтобетон в первую очередь теряет легкие фракции углеводородов. При их недостатке асфальтобетон становится хрупким, ускоряется образование трещин, снижается водостойкость и период эксплуатации.

Анализ ранее представленных теорий структурообразования в органоминеральных смесях позволил выдвинуть собственную теорию, которая основывается на теории взаимодействия битума и минеральных частиц, представленной в работах Королева И.В. [18; 19].

В асфальтобетоне минеральный порошок выполняет роль не только заполнителя микропустот между зернами минерального каркаса, а в большей степени как регулятор свойств битума. Битум представляется как трехфазная система, состоящая из асфальтенов, мальтенов и масел. Наиболее прочные по своей структуре являются асфальтены, масла наиболее подвижные и обеспечивают эластичность асфальтового вяжущего.

При контакте с поверхностью минеральных зерен масла имея хорошую текучесть способны глубоко проникать в микротрещины и поры, что должно обеспечивать снижение старения битума. Нами предложено выделить дополнительный внутренний слой минерального зерна, который способен абсорбировать часть масел из битума (рис. 1).



I — ориентированный слой; II — объемный битум; 1 — внутренняя зона минерального зерна; 2 — твердообразная зона; 3 — структурированная зона; 4 — диффузная зона

I — oriented layer; II — bulk bitumen; 1 — inner zone of mineral grain; 2 — solid zone; 3 — structured zone; 4 — diffuse zone

Рисунок 1. Минеральное зерно и слои битумного вяжущего (разработано авторами)

Figure 1. Mineral grain and layers of bitumen binder (developed by authors)

В целом структура формирования зон битумного вяжущего при контакте с минеральным зерном осталась как у Королева И.В., добавилась зона 1 (внутренняя зона минерального зерна) которая, как мы предполагаем, играет значительную роль при формировании зон 2, 3 и 4. Можно предположить, что адгезия битума к поверхности минерального зерна также будет определяться структурой поверхности. При наличии большого количества не замкнутых пор масла битума из зон 3 и 2 будут переходить в зону 1, увлекая за собой и асфальтены. Асфальтены имея значительно большую молекулярную массу и размер, при малых сечениях пор, не смогут пройти в глубь минеральной частицы формируя уплотненный поверхностный слой на поверхности минерального зерна. Наличие капилляров (пористой, слоистой поверхности) на зёрнах минерального порошка способны создать избирательную абсорбцию масел из битума, что позволит создать более прочные пленки асфальтенов и снизить скорость термического старения битума за счет купирования масел в поверхностном слое минеральных зерен. В формировании данного слоя участвуют конечно и силы молекулярного взаимодействия (силы Ван-дер-Ваальса) формируя коагуляционные, конденсационные и кристаллизационные связи, величина адгезии асфальтенов будет определяться химическим составом основной горной породы.

Таким образом можно предположить, что минеральные порошки с высокой удельной поверхностью (при одинаковом гранулометрическом составе) должны формировать структуру асфальтобетона с улучшенными

эксплуатационными показателями, способную снизить скорость термического старения асфальтобетона.

Методы и материалы

Methods and materials

Для подтверждения выдвинутой теории структурообразования при использовании минеральных порошков с высокой удельной поверхностью в составе асфальтобетона были произведены лабораторные исследования образцов асфальтобетонов, полученных с использованием в качестве мелкодисперсного заполнителя товарного минерального порошка и волокон хризотил-асбеста. Выбор в качестве объекта сравнения измельченных волокон хризотил-асбеста обусловлен гранулометрическим составом и слоистой структурой поверхности, которая придает волокнам хризотил-асбеста высокую удельную поверхность. Изделия из хризотилцемента разрешены к применению в строительстве в Российской Федерации в соответствии с гигиеническими нормативами ГН 2.1.2/2.2.1.1009-00. Под запрет попадает амфиболовый асбест.

В качестве минеральных материалов использовали: песок фракции 0–5 мм, ГОСТ 8735-2014; щебень, 10–20 мм, ГОСТ 8267-93; отсев дробления, 0–5 мм, ГОСТ 8735-2014 из карьера «III Поденный рудник», который расположен на северной части Алапаевского хромитоносного массива. В качестве вяжущего использовали битум БНД 90/130, ГОСТ 22245-90. В качестве мелкодисперсных минеральных заполнителей использовали минеральный порошок МП-1, ГОСТ 52129-2003 и волокна хризотил-асбеста, выделенные из аспирационной системы асфальтобетонного завода, использующего для производства асфальтобетонных смесей минеральные материалы (щебень, песок) произведенные из горных пород, вмещающих хризотил-асбест.

Для определения изменения термостабильности смеси битума с волокнами хризотил-асбеста, был использован метод синхронного термического анализа с совместным использованием термогравиметрии (ТГ) и дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) и метод выжигания битума из минеральной смеси.

Для определения удельной поверхности использовали прибор для измерения удельной поверхности дисперсных и пористых материалов «СОРБИ-М» (Россия). В качестве газа-носителя использовали гелий, в качестве газа-адсорбата — азот. Для расчета удельной поверхности использовали четырехточечный метод БЭТ (Брунауэр, Эммет, Теллер).

Для гранулометрического анализа материалов использовали метод дифракции лазерного луча, с использованием лазерного дифракционного анализатора Mastersizer 2000 фирмы Malvern. Измерение и обработка данных осуществляли при помощи программного обеспечения «Mastersizer 2000 Ver. 5.6»

Исследования

Studies

Спектрограмма и вещественный состав изученных проб волокон хризотил-асбеста представлены на рисунке 2 и таблице 1

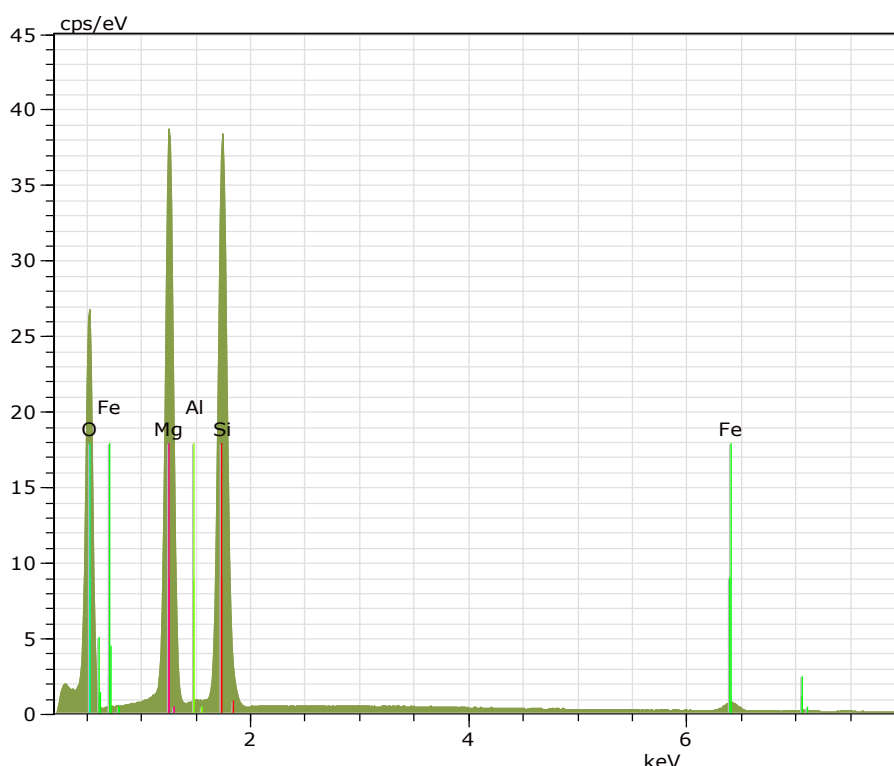


Рисунок 2. Спектрограмма волокна хризотил-асбеста (получено авторами)

Figure 2. Spectrogram of chrysotile-asbestos fibre (obtained by the authors)

Таблица 1 / Table 1

Вещественный состав хризотил-асбеста

Material composition of chrysotile-asbestos

Содержание, масс. % Content, wt. %									
MgO	SiO ₂	CaO	FeO	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	ZnO	CuO	NiO	MnO
49,6	47,4	2,2	2,1	0,9	0,8	0,6	0,15	0,1	0,1

Разработано авторами / Developed by the authors

Характер поверхности волокон хризотил-асбеста представлены на рисунке 3.

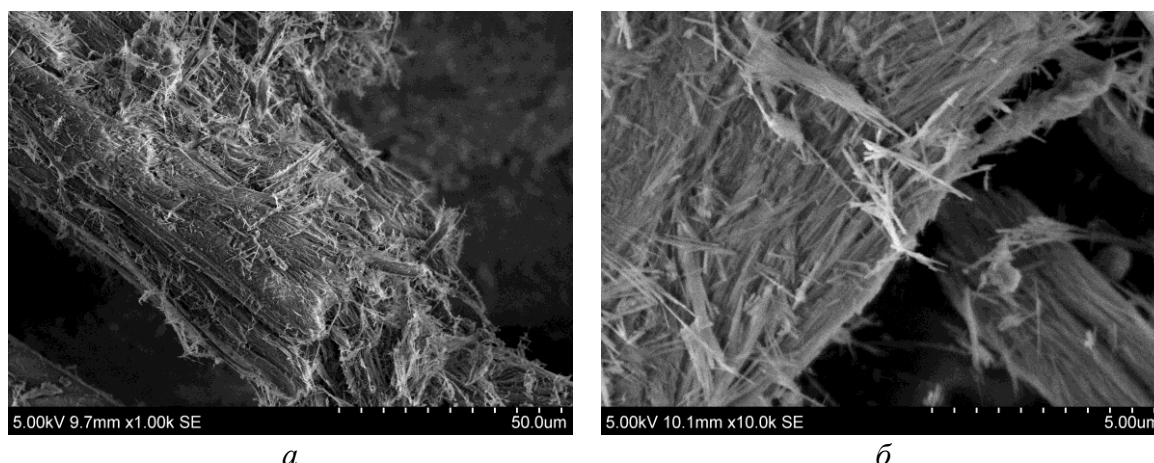


Рисунок 3. Волокно хризотил-асбеста
при увеличении: (а) в 1 тыс. раз; (б) в 10 тыс. раз (фото авторов)

Figure 3. Chrysotile-asbestos fibre at magnification by:
(a) a 1 thousand times; (b) a 10 thousand times (photo of the authors)

Оценка гранулометрического состава минерального порошка МП-1 и волокон хризотил-асбеста из аспирационной системы асфальтобетонного завода (АБЗ) позволила установить характер распределения частиц. Характер распределения частиц для минерального порошка МП-1 и представлен на рисунке 4.

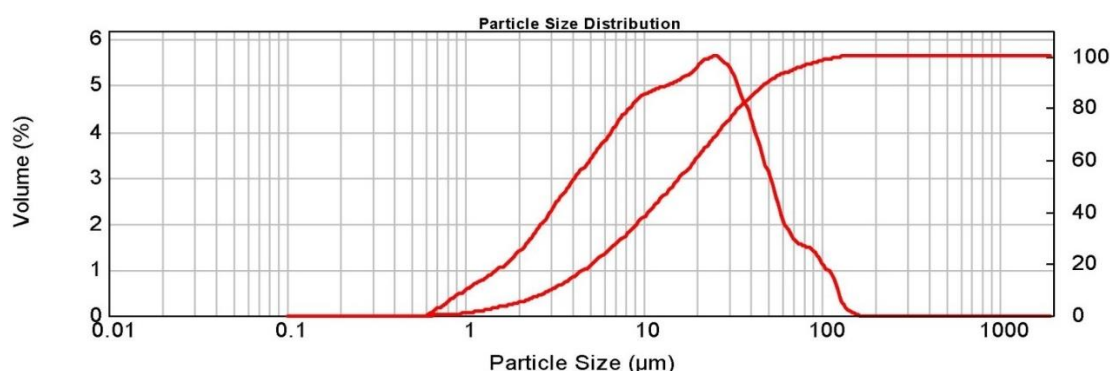


Рисунок 4. Характер распределения частиц
для минерального порошка МП-1 (получено авторами)

Figure 4. Particle distribution pattern for mineral powder МП-1 (obtained by the authors)

Были вычислены усредненные параметры зерен: средний арифметический диаметр равен 1,47 мкм; средний объёмный диаметр равен 22,11 мкм; средний поверхностный диаметр 7,37 мкм.

Характер распределения частиц для смеси мелкодисперсных минеральных частиц с волокнами хризотил-асбеста образующейся на АБЗ представлен на рисунке 5.

Были вычислены усредненные параметры зерен: средний арифметический диаметр равен 1,64 мкм; средний объёмный диаметр равен 45,68 мкм; средний поверхностный диаметр равен 10,78 мкм.

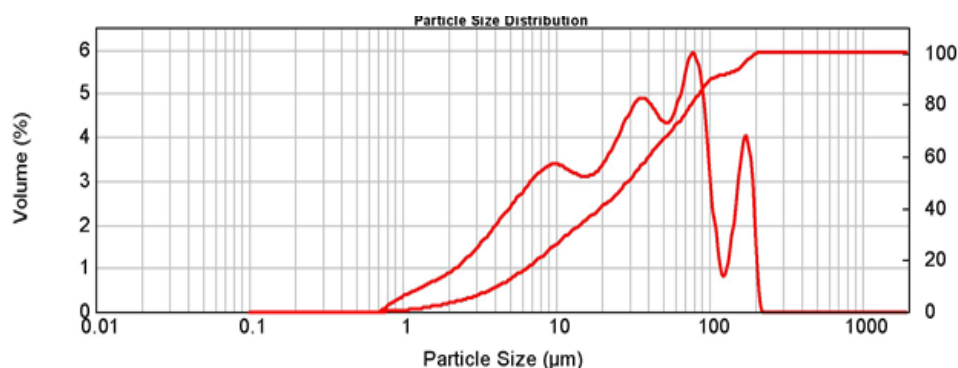


Рисунок 5. Характер распределения для смеси мелкодисперсных минеральных частиц с волокнами хризотил-асбеста образующейся на АБЗ (получено авторами)

Figure 5. Distribution pattern for a mixture of mineral dust particles with chrysotile-asbestos fibres formed at asphalt concrete plant (obtained by the authors)

Анализ распределения частиц позволил установить примерное сходство гранулометрического состава товарного минерального порошка МП-1 и мелкодисперсных минеральных частиц с волокнами хризотил-асбеста образующейся на АБЗ.

Определение удельных поверхностей для минерального порошка МП-1 и смеси мелкодисперсных частиц с волокнами хризотил-асбеста образующейся на АБЗ показало, что для МП-1 она составила $0,8 \pm 0,1$ м²/г, для частиц с волокнами хризотил-асбеста составила $17,4 \pm 0,4$ м²/г.

Оценка величины удельной поверхности показала, что при относительно одинаковом распределении гранулометрического состава частиц минерального порошка МП-1 и смеси мелкодисперсных частиц с волокнами хризотил-асбеста, последняя имеет в 21,8 раза большую удельную поверхность. Высокую удельную поверхность обеспечили свободные волокна хризотил-асбеста. Это подтверждается микросъемкой поверхности волокон хризотил-асбеста на электронном микроскопе.

Для установления влияния величины удельной поверхности на термоустойчивость асфальтового вяжущего, был проведен синхронный термический анализ. Оценка изменения массы образца для битума, смеси битума с минеральным порошком и смеси битума с волокнами хризотил-асбеста представлена на рисунке 6.

Анализ участка графика ТГ для температур от 35°C до 380°C показал, что потеря массы чистого битума составляет 18,76%, для смеси битума с минеральным порошком МП-1 14,68 %, потеря массы образца смеси битума и волокон хризотил-асбеста составляет 6,39 %. Это позволяет сделать вывод, что волокна хризотил-асбеста обладая повышенной удельной поверхностью при относительно одинаковом гранулометрическом составе повышают термоустойчивость битума и как следствие этого увеличивают время сохранения начальных реологических показателей асфальтобетона.

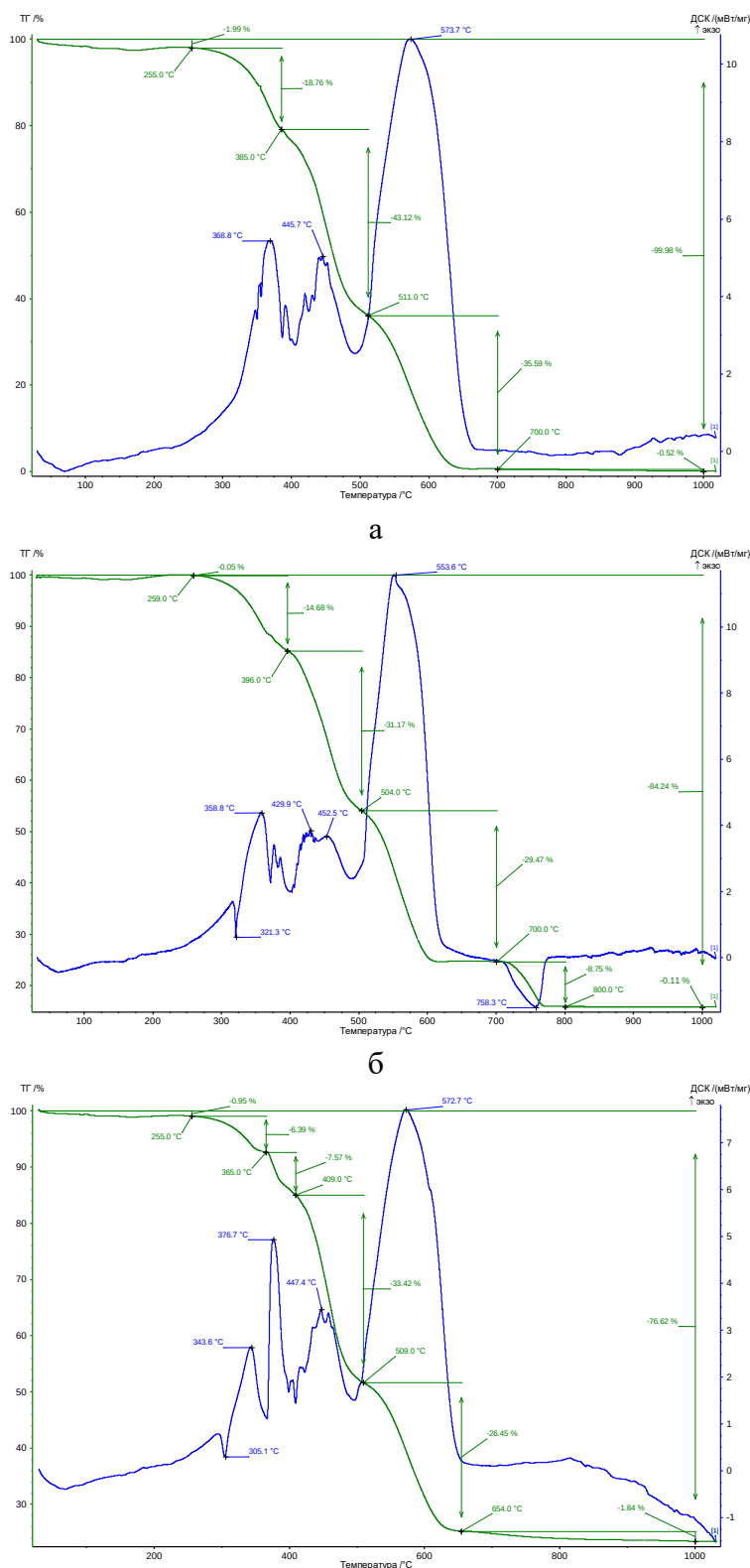


Рисунок 6. Совмещенные графики ДСК и ТГ: (а) битума;
(б) смеси битума с минеральным порошком; (в) смесь битума с волокнами
хризотил-асбеста (получено авторами)

Figure 6. Combined plots of differential scanning calorimetry
and thermogravimetric: (a) bitumen; (b) mixture of bitumen with mineral dust; (c) mixture
of bitumen with chrysotile-asbestos fibres (obtained by the authors)

При соотношении битум/хризотил-асбест равном 3/1 потеря легких фракций битума снижается в 2,9 раза по отношению к битуму без минеральных добавок и в 2,3 раза по сравнению при использовании товарного минерального порошка.

Для уточнения переносится ли эффект повышения термической стабильности битумов при использовании минеральных порошков с высокой удельной поверхностью на асфальтобетонные смеси, в лабораторных условиях были замешаны образцы асфальтобетонной смеси с МП-1 и волокнами хризотил-асбеста. В смеси лабораторного замеса содержание битума составило 6,49 % в 100 % смеси. Далее было произведено испытание экстрагирования битумного вяжущего методом выжигания по ГОСТ 12801-98 п. 23.3. Образец асфальтобетонной смеси с МП-1 достиг постоянной массы при 3 циклах. Образец с хризотил-асбестом достиг постоянной массы после 8 циклов. Далее было проведено испытание на потерю массы вяжущего при прогреве по ГОСТ 33140. Потеря массы при испытании составила 0,44 % для образца с хризотил-асбестом. При использовании в асфальтобетонной смеси МП-1 потеря вяжущего составляет 0,7 %.

Обсуждение

Discussion

Выдвинутая теория структурообразования в асфальтобетоне при использовании мелкодисперсных минеральных порошков с большой удельной поверхностью отчасти основывается на капиллярном явлении. В нашем случае происходит капиллярное впитывание масел битума которое характеризуется скоростью и зависит от капиллярного давления и вязкости битума. Капиллярное давление в свою очередь зависит от диаметра (поперечного размера) капилляра и поверхностного натяжения жидкости. Применительно к асфальтобетону, учитывая, что битум — это как минимум трёхкомпонентная система, для получения эффекта капиллярного впитывания, необходимо соблюсти соотношение размера пор (капилляров) минеральных зерен асфальтобетона к вязкости битума. Для получения оптимальной структуры асфальтобетона необходимо соотнести объем масел, который может заполнить выше указанные капилляры к объему, который необходим для сохранения достаточной эластичности асфальтобетонным слоем. При недостатке масел в битуме (избыток пор) асфальтобетон будет иметь низкие показатели в следствии не полного связывания всех зерен минерального каркаса в единую структуру. Избыток масел приведет к формированию в структуре асфальтобетона областей с объемным битумом, что так же приведет к увеличению пластических деформаций. В этой связи более точным

показателем для проектирования состава асфальтобетонной смеси является не гранулометрический состав, а удельная поверхность.

Синхронный термический анализ битумов с минеральными порошками, имеющими разную удельную поверхность, при относительно одинаковом гранулометрическом составе показал, эффективность использования порошков с высокой удельной поверхностью. Это подтверждает, что благодаря формированию избирательной фильтрации наиболее подвижной фракции битума поверхностным слоем минеральных зерен и формированию прочных хемсорбционных связей, возникающим на границе поверхности зерен и битумного вяжущего, формирования прочного слоя из асфальтенов процесс термического старения битума становится более длительным по времени. Масла битума удерживаются поверхностной структурой минеральных зерен, имеющих высокую удельную поверхность, что обеспечивает повышенный период эксплуатации асфальтобетонного покрытия.

Используемые в настоящее время минеральные порошки имеют не большую удельную поверхность. Перспективным направлением развития данной темы является использование для целей регулирования реологических характеристик битума минеральных порошков, имеющих высокую удельную поверхность. В частности, как показало исследование таким материалом является хризотил-асбест. Его волокна уже применяются в качестве стабилизирующей добавки при производстве щебеночно-мастичных асфальтобетонов.

Выводы

Conclusions

Существующие теории взаимодействий битума и минеральных материалов не берут во внимание структуру поверхности, минерального зерна, его возможность удерживать в своей структуре масла, которые обеспечивают эластичность битума (асфальтового вяжущего) и определяют скорость термического старения асфальтобетона.

При термическом старении асфальтобетон в первую очередь теряет легкие фракции углеводородов.

При их недостатке асфальтобетон становится хрупким, сокращается время его эксплуатации, ускоряется образование трещин, снижается водостойкость.

При снижении скорости потери легколетучих фракций битума возможно достичь снижения скорости старения битума.

На примере хризотил-асбеста, как минерального порошка с высокой удельной поверхностью установлено, что на участке изменения температуры от 35 до 400°C потеря массы образца битума с волокнами хризотил-асбеста была в 2,8 раза меньше.

Можно утверждать, что волокна хризотил-асбеста создают условия для сохранения масел битума в структуре асфальтобетона.

Обладая высокой удельной поверхностью минеральные порошки в асфальтобетоне выполняют функцию регулятора свойств асфальтового вяжущего формируя новую структуру асфальтобетона в целом, как композиционного материала.

Регулирующая способность основана на избирательной фильтрации (абсорбции) поверхностным слоем минеральных зерен масел битума.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Pugin, K.G.** The Use of Polymer Materials in the Composition of Asphalt Concrete / K. G. Pugin, O.V. Yakontseva, V.K. Salakhova, A.M. Burgonutdinov. — DOI <https://doi.org/10.21741/9781644901755-27> // Materials Research Proceedings. — 2022. — Т 21. — С. 150–155. — URL: <https://www.mrforum.com/product/9781644901755-27/>. (дата обращения: 02.05.2024).
2. **Гридчин, А.М.** Особенности взаимодействия битума с минеральными материалами из кислых пород / А.М. Гридчин, В.В. Ядыкина // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. — 2008. — № 40. — С. 13–16. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16403928>. — EDN NUZDRB. (дата обращения: 02.05.2024).
3. **Pugin, K.G.** Change in Properties of Bitumen Used for Road Construction in Bitumineral Mixtures / K.G. Pugin, O.V. Yakontseva, V.K. Salakhova, K.Yu. Tyuryukhanov. — DOI <https://doi.org/10.21741/9781644901755-32> // Materials Research Proceedings. — 2022. — Т 21. — С. 183–188. — URL: <https://www.mrforum.com/product/9781644901755-32/>. (дата обращения: 02.05.2024).
4. **Яконцева, О.В.** Использование горных пород с хризотил-асбестом для производства асфальтобетонных смесей / О.В. Яконцева, К.Г. Пугин // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. — 2024. — № 3. — С. 47–52.
5. **Гончарова, М.А.** Применение адгезионных добавок в асфальтобетоне с гранитным и шлаковым щебнем / М.А. Гончарова, И.А. Ткачева // Строительные материалы. — 2017. — № 11. — С. 39–42. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30744339>. — EDN ZWUFXT. (дата обращения: 02.05.2024).
6. **Ликомаскина, М.А.** Исследование влияния минеральных порошков различного химико-минералогического состава на свойства асфальтобетонных смесей / М.А. Ликомаскина, М.С.Р. Алнаиф, А.И. Сальникова, А.А. Миронов // Региональная архитектура и строительство. — 2017. — № 2. — С. 53–63. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30488669>. — EDN ZRETVD. (дата обращения: 02.05.2024).
7. **Иноземцев, С.С.** Выбор минерального носителя наноразмерной добавки для асфальтобетона / С.С. Иноземцев, Е.В. Королев // Вестник МГСУ. — 2014. — № 3. — С. 158–167. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21336835>. — EDN RYXTQZ. (дата обращения: 02.05.2024).
8. **Ядыкина, В.В.** Влияние природы материалов и режимов их измельчения на свойства асфальтобетона / В.В. Ядыкина, А.И. Траутвайн, А.М. Гридчин // Наука и техника в дорожной отрасли. — 2014. — № 4. — С. 26–29. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22411316>. — EDN SWLCIX. (дата обращения: 02.05.2024).

9. **Ерофеев, В.Т.** Исследование реологических свойств модифицированного битума / В.Т. Ерофеев, А.И. Сальникова // Вестник МГСУ. — 2016. — № 8. — С. 48–63. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26533917>. — EDN WQOROR. (дата обращения: 02.05.2024).
10. **Мухаматдинов, И.И.** Исследование реологических свойств дорожных битумов, модифицированных адгезионной присадкой / И.И. Мухаматдинов, А.Ф. Кемалов, П. С. Фахретдинов // Химия и технология топлив и масел. — 2017. — № 5. — С. 33–38. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32761775>. — EDN YVGBMK. (дата обращения: 17.05.2024).
11. **Горельшева, Л.А.** Теоретические аспекты систематизации добавок, улучшающих свойства битумного вяжущего и асфальтобетонной смеси / Л.А. Горельшева // Дороги и мосты. — 2019. — № 2. — С. 203–236. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45638090>. — EDN HSZYRN. (дата обращения: 17.05.2024).
12. **Казарян, С.О.** Стабилизирующие добавки для щебеночно-мастичных асфальтобетонов на основе высокодисперсных пористых минеральных материалов / С.О. Казарян // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2020. — № 1. — С. 149–156. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42737918>. — EDN GFCRGR. (дата обращения: 17.05.2024).
13. **Андронов, С.Ю.** Равномерное распределение фибры в холодных асфальтобетонных смесях с вязким микродиспергированным битумом / С.Ю. Андронов, В.И. Алферов, А.В. Кочетков [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.15862/17SATS120> // Транспортные сооружения. — 2020. — Т 7. — № 1. — С. 17SATS120. — URL: <https://t-s.today/17SATS120.html>. — EDN YYNIHR. (дата обращения: 17.05.2024).
14. **Андронов, С.Ю.** Технология дисперсно-армированного композиционного холодного щебеночно-мастичного асфальта / С.Ю. Андронов. — DOI https://doi.org/10.12737/article_58e61337c2ccd6.5582_2991 // Вестник Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова. — 2017. — № 4. — С. 67–71. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28904332>. — EDN YINIWT. (дата обращения: 17.05.2024).
15. **Кириухин, Г.Н.** К вопросу о теории структуры асфальтобетона / Г.Н. Кириухин // Дороги и мосты. — 2019. — № 1. — С. 247–261. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45648800>. — EDN STEFLF. (дата обращения: 17.05.2024).
16. **Чжан, Ц.** Термодинамическая оценка свойств и энергозатрат смешения асфальтобетона по структуре эксергии / Ц. Чжан, В.Н. Романюк, Б.М. Хрусталева, Ц. Хоу, Д. Хоу. — DOI <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-23-1-34-41> // Наука и техника. — 2023. — Т 22. — № 1. — С. 34–41. — URL: <https://sat.bntu.by/jour/article/view/2633>. (дата обращения: 17.05.2024).
17. **Симчук, Е.Н.** Современные подходы к моделированию старения битумных вяжущих материалов в лабораторных условиях / Е.Н. Симчук, А.В. Харпаев, И.М. Рожков // Дороги и мосты. — 2022. — № 2. — С. 274–306. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49855848>. — EDN HUWSYA. (дата обращения: 17.05.2024).
18. **Qin, X.** Characterization of asphalt mastics reinforced with basalt fibers / Qin X., Shen A., Guo Y., Li Z., Lv Z. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.012> // Construction and Building Materials. — 2018. — Т 159. — С. 508–516. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061817322225>. (дата обращения: 17.05.2024).
19. **Гридин А.М.** Дорожные композиты на основе дисперсного вспученного перлита / А.М. Гридин, А.П. Коротаев, В.В. Ядыкина [и др.] // Строительные материалы. — 2009. — № 5. — С. 42–44. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12448504>. — EDN KMKRMD. (дата обращения: 17.05.2024).

Сведения об авторах:

Пугин Константин Георгиевич — доктор технических наук, доцент, профессор, ФГБОУ ВО «Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова», Пермь, Россия, ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия, e-mail: 123zzz@rambler.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1768-8177>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=622336
WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/F-8610-2019>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=55823720700>

Яконцева Ольга Валерьевна — аспирант, ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия, e-mail: yakontseva.olga@yandex.ru
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57446060700>

Тюрюханов Кирилл Юрьевич — кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова», Пермь, Россия, ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия, e-mail: turuchanov.k.u@list.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=969266
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57204681794>

Статья получена: 09.07.2024. Принята к публикации: 27.08.2024. Опубликовано онлайн: 10.09.2024.

REFERENCES

1. Pugin K.G., Yakontseva O.V., Salakhova V.K., Burgonutdinov A.M. The Use of Polymer Materials in the Composition of Asphalt Concrete. *Materials Research Proceedings*. 2022;21: 150–155. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.21741/9781644901755-27>.
2. Gridchin A., Jadykina V. Features of Interaction of Bitumen with Mineral Materials from Sour Rocks. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2008;(40): 13–16. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16403928> (accessed 2nd May 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
3. Pugin K.G., Yakontseva O.V., Salakhova V.K., Tyuryukhanov K.Yu. Change in Properties of Bitumen Used for Road Construction in Bituminous Mixtures. *Materials Research Proceedings*. 2022;21: 183–188. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.21741/9781644901755-32>.
4. Yakontseva O.V., Pugin K.G. Ispol'zovaniye gornyykh porod s khризотил-asbestom dlya proizvodstva asfal'tobetonnykh smesey [Use of rocks with chrysotile asbestos for the production of asphalt concrete mixtures]. *Stroitel'nyye materialy, oborudovaniye, tekhnologii XXI veka* [Construction materials, equipment, technologies of the 21st century]. 2024;(3): 47–52. (In Russ.).
5. Goncharova M.A., Tkacheva I.A. The Use of Adhesion Additives in Asphalt Concrete with Granite and Slag Crushed Stone. *Stroitel'nye Materialy (Construction Materials)*. 2017;(11): 39–42. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30744339> (accessed 2nd May 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
6. Likomaskina M.A., Alnaif M.S., Salnikova A.I., Mironov A.A. Research of the Effect of Mineral Powders with Different Chemical-Mineralogical Compositions on Asphalt Concrete Mixtures' Properties. *Regional architecture and engineering*. 2017;(2): 53–63. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30488669> (accessed 2nd May 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
7. Inozemtsev S.S., Korolev E.V. Choosing Mineral Carrier of Nanoscale Additives for Asphalt Concrete. *Vestnik MGSU*. 2014;(3): 158–167. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21336835> (accessed 2nd May 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
8. Yadykina V.V., Trautvain A.I., Gridchin A.M. Analysis of the Regressive Dependence of The Influence of Features of Mineral Materials and Grinding Regimes on The Properties Asphalt. *Advanced Science and Technology for Highways*. 2014;(4): 26–29. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22411316> (accessed 2nd May 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
9. Erofeev V.T., Sal'nikova A.I. Investigation of Rheological Properties of Modified Bitumen. *Vestnik MGSU*. 2016;(8): 48–63. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26533917> (accessed 2nd May 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
10. Mukhamatdinov I.I., Kemalov, A.F., Fakhretudinov P.S. A Study of the Rheological Properties of Road Asphalts Modified by an Adhesive Additive. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2017;53(5): 683–691. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s10553-017-0850-2>.
11. Gorelysheva L.A. Theoretical Aspects of Systematization of Additives Improving Properties of Bituminous Binders and Asphalt Concrete Mixture. *Roads and bridges*. 2019;(2): 203–236. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45638090> (accessed 17th May 2024). (In Russ., abstract in Eng.).

12. Kazaryan S.O. Stabilizing Additives for Crushed Stone-Mastic Asphalt Concrete Based on Highly Dispersed Porous Mineral Materials. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2020;(1): 149–156. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42737918> (accessed 17th May 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
13. 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. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/17SATS120>.
14. Andronov S.Y. Technology of Disperse-Reinforced Composition Cold Pulp-Film-Mastic Asphalt. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2017;(4): 67–71. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: https://doi.org/10.12737/article_58e61337c2ccd6.55822991.
15. Kiryukhin G.N. On the Theory of Asphalt Concrete Structure. *Roads and bridges*. 2019;(1): 247–261. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45648800> (accessed 17th May 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
16. Zhang Q., Romaniuk V.N., Khroustalev B.M., Hou Q., Hou D. Thermodynamic Evaluation of Asphalt Concrete Properties and its Mixing Energy Consumption by Exergy Structure. *Science & Technique*. 2023;22(1): 34–41. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-23-1-34-41>.
17. Simchuk E.N., Kharpaev A.V., Rozhkov I.M. Modern Approaches to Modeling the Aging of Bitumen Binders in The Laboratory. *Roads and bridges*. 2022;(2): 274–306. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49855848> (accessed 17th May 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
18. Qin X., Shen A., Guo Y., Li Z., Lv Z. Characterization of asphalt mastics reinforced with basalt fibers. *Construction and Building Materials*. 2018;159: 508–516. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.012>.
19. Gridchin A.M., Korotayev A.P., Yadykina V.V. et al. [Road composites based on dispersed expanded perlite]. *Stroitel'nye Materialy (Construction Materials)*. 2009;(5): 42–44. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12448504> (accessed 17th May 2024). (In Russ.).

Information about the authors:

Konstantin G. Pugin — Perm State Agrarian-Technological University named after Academician D.N. Pryanishnikov, Perm, Russia, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, e-mail: 123zzz@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1768-8177>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=622336

WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/F-8610-2019>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=55823720700>

Olga V. Yakontseva — Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, e-mail: yakontseva.olga@yandex.ru

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57446060700>

Kirill Yu. Tyuryukhanov — Perm State Agrarian-Technological University named after Academician D.N. Pryanishnikov, Perm, Russia, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, e-mail: turuchanov.k.u@list.ru

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=969266

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57204681794>

Submitted: 9th July 2024. Revised: 27th August 2024. Published online: 10th September 2024.