

УДК 625.855.31

Смирнов Денис Сергеевич

кандидат технических наук, доцент

E-mail: denis27111974@yandex.ru

Ягунд Эдуард Михайлович

кандидат химических наук, доцент

E-mail: emj@rambler.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Броднева Валерия Евгеньевна

лаборант

E-mail: valeria011278@gmail.com

АО «Татавтодор»

Адрес организации: 420012, Россия, г. Казань, ул. Достоевского, д. 18/75

Оценка воздействия целлюлозных примесей на свойства щебеночно-мастичного асфальтобетона

Аннотация

Постановка задачи. Цель исследования – выявление воздействия целлюлозных примесей на свойства щебеночно-мастичного асфальтобетона (ЩМА), рассмотрение свойств щебеночно-мастичного асфальтобетона, который принципиально сочетает в себе преимущества ударного бетона и максимально структурного асфальтобетона, изучение влияния различных видов стабилизирующих добавок на характеристики щебеночно-мастичного асфальтобетона.

Результаты. Основные результаты исследования состоят в выявлении закономерности изменения физико-механических свойств в зависимости от использованной стабилизирующей добавки. Были проведены исследования ИК-спектров, испытания на показатели предела прочности при сжатии, сопротивления сдвигу, трещиностойкости. Выявлена закономерность повышения физико-механических свойств асфальтобетонной смеси в составе, содержащем стабилизирующую добавку. Это связано с высоким содержанием в ней карбоната кальция, который образует более прочные хемосорбционные связи с битумом на границе раздела фаз.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что в ходе исследования зависимости свойств щебеночно-мастичного асфальтобетона от применяемой стабилизирующей добавки с различным содержанием карбоната кальция, было установлено, что применение стабилизирующей добавки с высоким содержанием карбоната кальция повышает физические, механические и эксплуатационные свойства асфальтобетона.

Ключевые слова: асфальтобетон, битум, прочность, сопротивление сдвигу, мелковолокнистый наполнитель, метод ИК-спектроскопии.

Для цитирования: Смирнов Д. С., Ягунд Э. М., Броднева В. Е. Оценка воздействия целлюлозных примесей на свойства щебеночно-мастичного асфальтобетона // Известия КГАСУ. 2020. № 4 (54). С. 80–87.

1. Введение

Способность асфальтобетона выдерживать различные рабочие нагрузки в основном зависит от наиболее слабой составной части системы, другими словами, от связующего материала – битума. Повышение этой способности при различных климатических условиях, физических и механических нагрузках, является одной из главных проблем в современном дорожном строительстве. На сегодняшний день есть несколько основных путей решения вопроса увеличения прочности и сопротивления сдвигу асфальтобетона: изменение параметров связующего с помощью его модификации и увеличение роли щебеночного каркаса, что достигается благодаря изменению гранулометрического состава и добавлению шлака и приводит к повышению структурообразующего эффекта [1].

Эти направления повышения прочности и сопротивления сдвигу применялись отдельно. Ограниченным было и повышение вязкости: переход на битум БНД 40/60 повышал хрупкость асфальтобетона и количество трещин на покрытии. Эти проблемы были решены модификацией битума полимерами, но структурообразующее свойство асфальтобетона было применимо не в полном объеме. Увеличение щебеночного каркаса асфальтобетонной смеси до 45-55 % повысило сопротивление сдвигу в 1,3-1,4 раза, но такая структура стала неустойчива к воздействию воды и циклов промерзания и оттаивания.

Главной задачей стало устранение вышеуказанных недостатков. Была получена смесь, удовлетворяющая параметрам смачивания и перемешивания, благодаря увеличению расхода битума и добавлению горных пород до 70-78 %, которые увеличивали сопротивление и противоскольжение. Недостатком стало то, что при перевозке смесь расслаивалась, это было устранено путем добавления мелковолокнистого наполнителя с большой удельной поверхностью. Итогом стало создание щебеночно-мастичного асфальтобетона (ЩМА) – материала для дорожного покрытия, используемого обычно на магистралях, который отличается от обычного асфальтобетона более высокими прочностными характеристиками, температурной и коррозионной устойчивостью, что достигается увеличением крупного заполнителя [2].

Однако появилась проблема подбора связующего, минеральных заполнителей и стабилизирующих добавок. Стабилизирующая добавка – вещество, которое оказывает стабилизирующее действие на ЩМА и обеспечивает его сопротивление расслоению. Чаще всего это искусственные добавки, например, целлюлоза или некоторые синтетические волокна. Целлюлозные волокна бывают не только в свободном виде, но и в виде гранул, а также в смеси с углеводородными продуктами (в данном исследовании гранулированный вид добавки, вследствие его известности и доступности на рынке, был взят в качестве основного) [3-4].

Также необходимо отметить, что на сегодняшний день существуют два основных метода взвешиваний: весовой и объемный. Весовой метод дозирования является наиболее точным, объемный уступает ему. Гранулированные волокна взвешивают первым методом, а свободные – вторым. Разница взвешиваний позволяет сделать вывод, что гранулированные волокна имеют преимущество благодаря наиболее точному способу дозирования. Технологически гранулированные волокна удобны при работе на асфальтосмесителе, при распределении их внутри смесителя и при подаче.

В настоящее время ведутся работы по улучшению эксплуатационных свойств щебеночно-мастичного асфальтобетона по различным направлениям. Таким как введение в состав резиновой крошки, введение минеральных и органических волокон, внесение различных модификаций в гранулированный полимер [5-7].

Эти меры, в свою очередь, сопряжены с большими экономическими затратами на первых этапах коммерциализации, в отличие от элементарного и материального выбора стабилизирующей добавки. Кроме этого, на сегодняшний день существует проблема выбора стабилизирующей добавки в ЩМА с надлежащим для производства качеством. Современные дорожные организации при проведении торгов сталкиваются с проблемой выставления технических требований к стабилизирующей добавке в виду того, что не имеют достоверных характеристик её применения и проявления ее свойств на ЩМА. Одна из задач проведенных исследований – устранение данной проблемы. Результаты испытаний могут быть основополагающими при выборе стабилизирующей добавки и ее параметров. Следовательно, будут увеличиваться физико-механические свойства асфальтобетона, а значит, будет повышено качество автомобильных дорог.

Целью данной работы является исследование влияния стабилизирующих добавок на основе целлюлозы на характеристики щебеночно-мастичного асфальтобетона, рассмотрение изменения его свойств.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- проведение ИК-спектроскопии;
- проведение испытаний предела прочности при сжатии;
- проведение испытаний на сопротивление сдвигу;
- проведение испытаний на показатель трещиностойкости;
- оценка и анализ полученных результатов.

2. Материалы и методы

Для исследования использовались 4 вида стабилизирующих добавок самых известных производителей России. В данной работе они представлены под номерами № 1-4. Материальный состав стабилизирующих добавок оценивался с помощью спектрального анализа образцов. Испытание проводили на инфракрасном спектрофотометре с преобразованием Фурье Perkin-Elmer, модель Spectrum65, с использованием Miracle ATR (кристалл ZnSe) в области $4000-600\text{ см}^{-1}$, обычно с двадцатью сканированиями. Для регистрации инфракрасных спектров образцы обработанной целлюлозы в виде черных гранул прижимались к кристаллу с помощью специального зажима, входящего в комплект приставки. После регистрации автоматически выполнялась коррекция и сохранение спектра. Спектры обрабатывались с помощью прилагаемого программного обеспечения (Perkin-Elmer Softwear V.10.1.1).

Влияние типа стабилизирующей добавки на физико-механические свойства щебеночно-мастичного асфальтобетона проводили на стандартных образцах, для которых в лабораторных условиях были приготовлены смеси с отдельным фракционированием минеральных зерен и стабилизирующих добавок № 1, № 2, № 3 и № 4. Для проведения работ был выбран гранулометрический состав ЩМА 20, содержащий: 76 % каменной породы, 11 % отсевов рыхлого материала и 13 % минерального порошка (не диспергированного). Количество битума в составе смесей составляло 6,1 % по минеральной части и 0,4 % стабилизирующей добавки от массы смеси, гранулометрический состав, оптимальное количество вяжущего и количество стабилизирующей добавки были взяты на основании работ [8-11].

Битум использовался в качестве связующего для приготовления ЩМА и характеризовался следующими параметрами: пенетрация при 25°C – $89 \times 0,1\text{ мм}$, температура размягчения – 48°C , растяжимость при 25°C $> 100\text{ см}$, что позволяет его классифицировать согласно ДСТУ 4044-2001 к битуму марки БНД 90/130, а также отмечает улучшение свойств битума при добавлении в смесь стабилизирующей добавки из целлюлозы. Приготовленные смеси удовлетворяли всем техническим нормам [12-16].

3. Результаты и обсуждение

Для оценки свойств стабилизирующей добавки в ходе исследований были проведены следующие испытания:

- ИК-спектроскопия;
- испытания предела прочности при сжатии;
- испытания на сопротивление сдвигу;
- испытания на показатель трещиностойкости;
- испытания на индекс дренажа.

Результаты ИК-спектроскопии испытуемых образцов представлены на рис. 1.

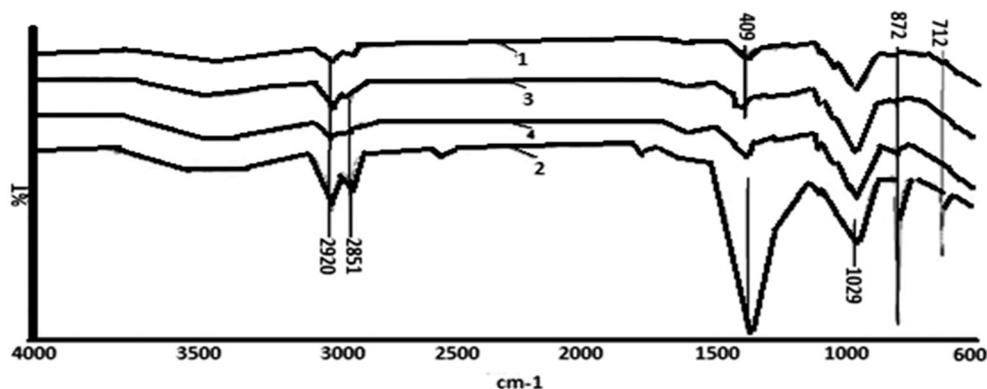


Рис. 1. ИК-спектры образцов целлюлозы 1,2,3 и 4 (иллюстрация авторов)

Все четыре образца характеризуются наличием характеристических полос при 2920 и 2851 см^{-1} , соответствующих валентным колебаниям групп CH и CH_2 , а также пика при

1029 cm^{-1} , вызванного колебаниями связей С-О, которые являются частью циклов пиранозы целлюлозы. Первое, на что следует обратить внимание, это наличие в спектре образца 2 интенсивных полос 1409, 872 и 712 cm^{-1} , которые практически отсутствуют в спектрах образцов 1, 3 и 4. Анализ этих пиков позволяет сделать вывод, что они обусловлены наличием в спектре образца 2 большого количества карбоната кальция CaCO_3 или просто известняка. Действительно, сравнение спектров образца 2 и чистого известняка показывает, что пики 1409, 872 и 712 cm^{-1} присутствуют в обоих спектрах, то есть в спектре образца 2, его реакции на карбонат кальция (рис. 2).

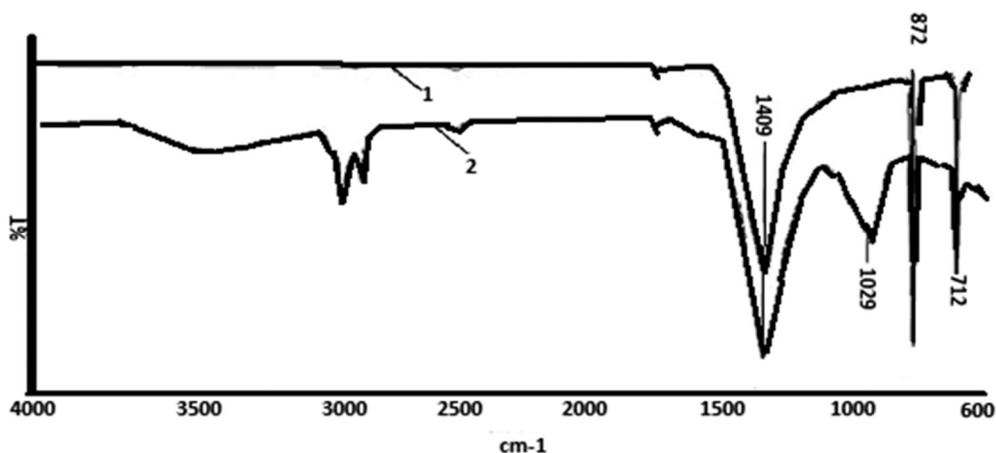


Рис. 2. Спектры карбоната кальция (1) и образца 2 (иллюстрация авторов)

Следующим шагом в работе стало установление различий в свойствах образцов 1 и 3. Приведены ИК-спектры этих образцов, а также спектр чистого битума (рис. 3).

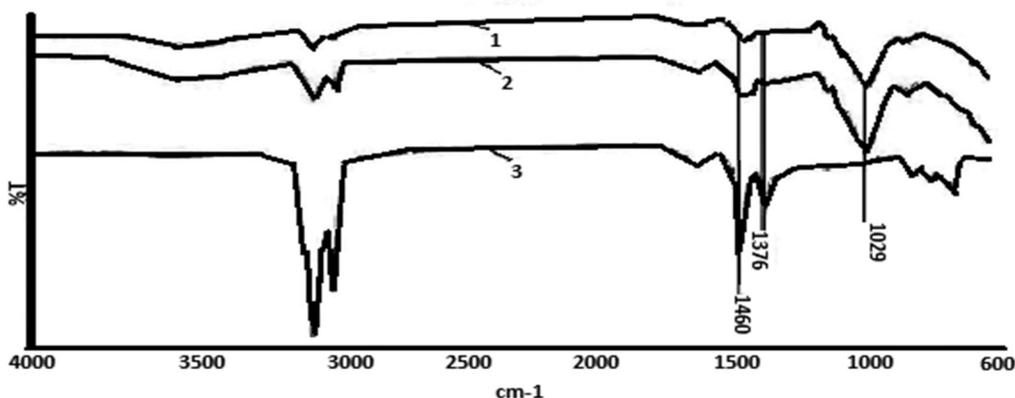


Рис. 3. ИК-спектры образцов 1 (1), 3 (2) и чистого битума марки БНД 70-100 (3) (иллюстрация авторов)

Сравнение спектров 1 и 3 показывает, что содержание и структура целлюлозы примерно одинаковы, поскольку полоса 1029 cm^{-1} , соответствующая целлюлозе, совпадает по конфигурации и интенсивности.

Анализ по пикам валентных колебаний групп CH и CH_2 в этом случае невозможен, так как в этой области наблюдается сильное пересечение колебаний этих групп как от целлюлозы, так и от битума. Однако, можно проследить различия в области деформационных колебаний групп CH_2 на частоте 1460 cm^{-1} и CH_3 на частоте 1376 cm^{-1} .

Как видно на рис. 3, в битуме есть интенсивные пики обоих типов колебаний. Более того, если сравнить спектры образцов 1 и 3, то можно увидеть, что во втором спектре пиковая интенсивность 1460 cm^{-1} , соответствующая группам CH_2 битума, несколько выше, чем в первом. Из этого можно сделать вывод, что содержание битума в образце 3

несколько выше, чем в образце 1. В результате ИК-спектроскопии был сделан вывод, что образец 2 содержит в себе наибольшее количество карбоната кальция, а образцы 1 и 3 могут отличаться по свойствам из-за различного содержания битума.

Расчетными показателями при сравнительных испытаниях были прочность при 20 °С и 50 °С, сопротивление сдвигу по коэффициенту внутреннего трения, сопротивление сдвигу от адгезии при сдвиге при температуре 50 °С. Полученные результаты в целом соответствовали требованиям отечественных нормативных документов. Тем не менее, несмотря на одинаковый состав, а также используемые минеральные компоненты и битум, есть некоторые различия в результатах.

В композиции со стабилизирующей добавкой № 2 прочность на сжатие при 20 °С несколько выше, чем у аналогичных композиций с добавкой № 1 и 4, и на 8 % выше, чем у композиции с добавкой № 3 (табл. 1).

Таблица 1

Результаты испытаний предела прочности при сжатии при 20 °С, МПа

Наименование образца	Прочность на сжатие при 20 °С, МПа
Образец № 1	5,24
Образец № 2	5,31
Образец № 3	4,90
Образец № 4	5,20

Наибольшую прочность на сжатие при 50 °С имеет также состав со стабилизирующей добавкой № 2 (табл. 2).

Можно сделать вывод, что образец № 2 имеет наибольшие показатели пределов прочности при сжатии, а значит, имеет преимущества перед другими образцами по физико-механическим свойствам.

Таблица 2

Результаты испытаний предела прочности при сжатии при 50 °С, МПа

Наименование образца	Прочность на сжатие при 50 °С, МПа
Образец № 1	1,30
Образец № 2	1,38
Образец № 3	1,35
Образец № 4	1,30

В табл. 3 показаны результаты испытаний композиций на сопротивление сдвигу.

Видно, что состав со стабилизирующей добавкой № 2 также имеет более высокие характеристики.

Таблица 3

Результаты испытаний на сопротивление сдвигу

Наименование испытания	Наименование образца			
	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Образец № 4
Сопротивление сдвигу по коэффициенту внутреннего трения	0,960	0,963	0,962	0,951
Сопротивление сдвигу за счет когезии при сдвиге при температуре 50 °С	0,233	0,246	0,242	0,238

Также были проведены испытания на показатель трещиностойкости по пределу прочности при расколе при 0 °С и на индекс дренажа. В них образец 2 также проявил наилучшие показатели. По сравнению с другими, показатель трещиностойкости увеличивается на 7-9 %, а индекс дренажа снижается на 1-3 %, что подтверждает его преимущества перед другими образцами.

Выявление оптимального содержания битума методом дренажа – важнейшая технологическая стадия по приготовлению ШМА. Этот метод определяет процентное

содержание связующего, оставшегося на стеклянных стенках после выдерживания в нем смеси при температуре 170 °С в течение 60 минут. По итогам исследования индекса стекания определяется оптимальное содержание битума для стабилизирующей добавки.

Полученные численные значения характеристик разработанных композиций сравнивали с требованиями стандартов. Составы удовлетворяют этим требованиям.

В ходе испытаний выявлена закономерность изменения физико-механических свойств в зависимости от использованной стабилизирующей добавки.

Возможно, что более высокие прочностные характеристики данной композиции связаны с повышенным содержанием в составе стабилизирующей добавки микрочастиц CaCO_3 , которые за счет более сильных хемосорбционных связей с битумом, образуют кальциевые мыла на границе раздела фаз «битум-наполнитель»:



Показатели средней плотности и водонасыщенности в целом имеют примерно равные значения. Это свидетельствует об однородности макроструктуры рассматриваемых составов. Представленные результаты исследований можно использовать при проектировании состава щебеночно-мастичного асфальтобетона с использованием стабилизирующей добавки на основе целлюлозы.

4. Заключение

1. В работе изучалось количество образцов целлюлозы, обработанных битумом. В образцах 1, 3 и 4 наблюдались только следовые количества карбоната кальция (не более 5 % по массе). Различия в свойствах образцов 1 и 3 вызваны разницей в содержании битума в этих образцах.

2. Установлено, что образец 3 дает более интенсивную полосу 1460 cm^{-1} , соответствующую деформационным колебаниям CH_2 групп битума, чем образец 1, с примерно равным содержанием целлюлозы. Образцы 1, 3 и 4 практически не содержат карбоната кальция.

3. Проведенные испытания показали, что в образце 2 высокое содержание карбоната кальция CaCO_3 , что обуславливается рваностью известняка до частиц микронного размера. В то же время в образце 2 содержание CaCO_3 не менее 50 %. Выявлена закономерность повышения физико-механических свойств асфальтобетонной смеси в составе, содержащем стабилизирующую добавку № 2. Это связано с высоким содержанием в стабилизирующей добавке № 2 карбоната кальция CaCO_3 , который образует более прочные хемосорбционные связи с битумом на границе раздела фаз.

Список библиографических ссылок

1. Псюрник В. В., Чугуенко С. А., Опришко А. В., Золоторев В. А. Роль волокон в формировании физико-механических свойств асфальтобетона // Вестник ХНАДУ. 2005. В 30. С. 203–206. DOI: 15601129/ 2219-5548.2005.30.203-206.
2. Поспелова А. А., Черакшина З. Д. Стабилизирующая добавка для асфальтобетона : сб. ст. Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 160-летию со дня рождения В.Г. Шухова / БГТУ им. В.Г. Шухова, 2013. С. 1206–1209.
3. Гезенцвей Л. Б., Горелышев Н. В. Дорожный асфальтобетон. М. : Транспорт, 1985. 350 с.
4. Александров Д. Ю. Перспективы применения комплексно-модифицированного асфальтобетона в дорожном строительстве // Наука и техника. 2017. В 4. С. 315–323. DOI: 30627272/ 2227-1031.2017.4.315-323.
5. Грушко И. М., Королёв И. В. Дорожно-строительные материалы. М. : Транспорт, 1991. 357 с.
6. Баранов И. А. Оценка эффективности стабилизирующих добавок для улучшения структуры и свойств щебеночно-мастичного асфальтобетона. Орел : 2015. 176 с.
7. Колбановская А. С., Михайлов В. В. Дорожные битумы. М. : Транспорт, 1973. 264 с.
8. Худоконенко А. А. Анализ требований отечественных и зарубежных нормативных документов к составам асфальтобетонных смесей : тезисы докладов Международной научно-практической конференции / Ростов-на-Дону, 2015. С. 28–29.

9. Хафизов Э. Р., Абубакиров Д. А. Асфальтобетон на основе модифицированной добавки EVOTERM J1 // Техника и технология транспорта. 2019. В. 11. С. 44. DOI: 38206136/ 625.856. 2019.11.44.
10. Транспорт России. Информационно-статистический бюллетень // www.mintrans.ru : интерн-изд. 2014. URL: http://www.mintrans.ru/upload/iblock/5cd/stat_2014.pdf (дата обращения: 11.09.2020).
11. Центральная база статистических данных Росстата // cbsd.gks.ru интернет-ресурс. 2015. URL: <http://cbsd.gks.ru/> (дата обращения: 01.10.2020).
12. Desseaux S., Santos S., Geiger T., Tingaut P., Zimmermann T. N., Part M. D., Poulikakos L. Improved mechanical properties of bitumen modified with acetylated cellulose fibers // Composites Part B – Engineering, 2018. P. 139–144. DOI: 10.1016/2017.12.010.
13. Awanti S. S. Laboratory Evaluation of SMA Mixes Prepared with SBS Modified and Neat Bitumen Procedia // Social and Behavioral Sciences, 2017. Vol. 104. P. 59–68. DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.11.098.
14. Ameli A., Babagoli R., Norouzi N., Jalali F., Poorheydari Mamaghani F. Laboratory evaluation of the effect of coal waste ash (CWA) and rice husk ash (RHA) on performance of asphalt mastics and Stone matrix asphalt (SMA) mixture // Construction and Building Materials, 2020. P. 117–127. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117557.
15. Kiran Kumar N. L., Ravitheja A. Characteristics of stone matrix asphalt by using natural fibers as additives // Materials today, 2019. Vol. 19. P. 397–402. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.624.
16. Sadeghian M., Latifi Namin M., Goli H. Evaluation of the fatigue failure and recovery of SMA mixtures with cellulose fiber and with SBS modifier // Construction and Building Materials, 2019. P. 818–826. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.308.

Smirnov Denis Sergeevich

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: denis27111974@yandex.ru

Yagund Eduard Mikhailovich

candidate of chemical sciences, associate professor

E-mail: emj@rambler.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Brodneva Valeria Evgenievna

laboratory assistant

E-mail: valeria011278@gmail.com

JSC «Tatavtodor»

The organization address: 420012, Russia, Kazan, Dostoevsky st., 18/75

Assessment of the impact of cellulose impurities on the properties of crushed stone mastic asphalt concrete**Abstract**

Problem statement. The purpose of the study is to identify the effect of cellulosic impurities on the properties of crushed stone-mastic asphalt concrete (SMAC), consider the properties of crushed stone-mastic asphalt concrete, which fundamentally combines the advantages of impact concrete and maximum structural asphalt concrete, study the influence of various types of stabilizing additives on the characteristics of crushed stone-mastic asphalt concrete.

Results. The main results of the study are to identify the regularity of the change in physical and mechanical properties depending on the stabilizing additive used. Studies of IR-spectra, tests for indicators of compressive strength, shear resistance, crack resistance were carried out. The regularity of increasing the physical and mechanical properties of asphalt concrete mixture in a composition containing the stabilizing additive was revealed. This is due to the high content of calcium carbonate in it, which forms stronger chemisorption bonds with bitumen at the phase interface.

Conclusions. The significance of the obtained results for the construction industry is that in the study of the dependence of the properties of crushed stone-mastic asphalt concrete on the used stabilizing additive with different content of calcium carbonate, it was found that the use of a stabilizing additive with high content of calcium carbonate increases the physical, mechanical and operational properties of asphalt concrete.

Keywords: asphalt concrete, bitumen, strength, shear resistance, fine-fiber aggregate, IR-spectroscopy method.

For citation: Smirnov D. S., Yagund E. M., Brodneva V. E. Assessment of the impact of cellulose impurities on the properties of crushed stone mastic asphalt concrete // *Izvestija KGASU*. 2020. № 4 (54). P. 80–87.

References

1. Psyurnik V. V., Chuguenko S. A., Oprishko A. V., Zolotorev V. A. The role of fibers in the formation of the physical and mechanical properties of asphalt concrete // *Vestnik KHNADU*. 2005. AT 30. P. 203–206. DOI: 15601129/ 2219-5548.2005.30.203-206.
2. Pospelova A. A., Cherakshina Z. D. Stabilizing additive for asphalt concrete : sb. art. International Scientific and Technical Conference of Young Scientists BSTU named after V. G. Shukhov, dedicated to the 160th anniversary of the birth of V.G. Shukhov / BSTU named after V.G. Shukhov, 2013. P. 1206–1209.
3. Gezentsvey L. B., Gorelyshev N. V. Road asphalt concrete. M.: Transport, 1985. 350 s.
4. Alexandrov D. Yu. Prospects for the use of complex-modified asphalt concrete in road construction // *Nauka i tekhnika*. 2017. IN 4. P. 315–323. DOI: 30627272/ 2227-1031.2017.4.315-323.
5. Grushko I. M., Korolev I. V. Road construction materials. M. : Transport, 1991. 357 p.
6. Baranov I. A. Assessment of the effectiveness of stabilizing additives for improving the structure and properties of crushed stone-mastic asphalt concrete. Orel: 2015. 176 p.
7. Kolbanovskaya A. S., Mikhailov V. V. Road bitums. M. : Transport, 1973. 264 p.
8. Khudokononko A. A. Analysis of the requirements of domestic and foreign regulatory documents for the compositions of asphalt concrete mixtures: abstracts of reports of the International Scientific and Practical Conference / Rostov-on-Don, 2015. P. 28–29.
9. Khafizov E. R., Abubakirov D. A. Asphalt concrete based on the modified EVOTERM additive J1 // *Tekhnika i tekhnologiya transporta*. 2019. B. 11. P. 44. DOI: 38206136/ 625.856. 2019.11.44.
10. Transport of Russia. Statistical Information Bulletin // *mintrans.ru* : Interne ed. 2014. URL: http://www.mintrans.ru/upload/iblock/5cd/stat_2014.pdf (reference date: 11.09.2020).
11. The central database of statistics of Rosstat // *cbds.gks.ru* : Internet resource. 2015. URL: <http://cbds.gks.ru/> (reference date: 01.10.2020).
12. Desseaux S., Santos S., Geiger T., Tingaut P., Zimmermann T. N., Part M. D., Poulikakos L. Improved mechanical properties of bitumen modified with acetylated cellulose fibers // *Composites Part B – Engineering*, 2018. P. 139–144. DOI: 10.1016/2017.12.010.
13. Awanti S. S. Laboratory Evaluation of SMA Mixes Prepared with SBS Modified and Neat Bitumen Procedia // *Social and Behavioral Sciences*, 2017. Vol. 104. P. 59–68. DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.11.098.
14. Ameli A., Babagoli R., Norouzi N., Jalali F., Poorheydari Mamaghani F. Laboratory evaluation of the effect of coal waste ash (CWA) and rice husk ash (RHA) on performance of asphalt mastics and Stone matrix asphalt (SMA) mixture // *Construction and Building Materials*, 2020. P. 117–127. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117557.
15. Kiran Kumar N. L., Ravitheja A. Characteristics of stone matrix asphalt by using natural fibers as additives // *Materials today*, 2019. Vol. 19. P. 397–402. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.624.
16. Sadeghian M., Latifi Namin M., Goli H. Evaluation of the fatigue failure and recovery of SMA mixtures with cellulose fiber and with SBS modifier // *Construction and Building Materials*, 2019. P. 818–826. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.308.