

Асфальтобетон с использованием отходов полимеров заводов СибириВасиловская Г.В.¹ [0000-0002-1411-0054], Берсенева М.Л.² [0000-0002-9831-7019], Янаев Е.Ю.³ [0000-0002-3003-8566]

^{1,2,3} Сибирский федеральный университет, 660041, Красноярский край, город Красноярск, проспект
Свободный, 79, Россия

Аннотация: приводятся результаты исследований асфальтобетона с применением отходов полимеров заводов Сибири. Изучались резиновая крошка на каучуках общего назначения, полученная путем измельчения старых автомобильных покрышек и бутилкаучуковая резиновая крошка шиноремонтного завода г. Красноярска, коагулум девулканизированный Красноярского завода синтетического каучука, атактический полипропилен химкомбината г. Томска. С помощью ИК-спектроскопии изучался характер взаимодействия полимерных отходов с битумом. Установлено, что только бутилкаучуковая резиновая крошка химически взаимодействует с битумом. Остальные отходы с битумом образуют гетерогенные двухфазные смеси. Определены основные свойства полимерных отходов, а также минеральных заполнителей для асфальтобетона и битума. В качестве минерального порошка в асфальтобетоне применялся отход производства Красноярского химико-металлургического завода. С помощью химического и рентгенографического анализов изучался состав этого порошка. С полимерными отходами были приготовлены составы полимербитумных вяжущих и определены их основные физико-механические показатели. На основании проведенных исследований выбраны оптимальные составы полимербитумных вяжущих. С применением местных минеральных заполнителей и оптимальных составов полимербитумных вяжущих были рассчитаны и приготовлены составы асфальтополимербетона, которые испытывались на основные физико-механические показатели. Установлено, что все полимерные добавки улучшают свойства асфальтобетона, но лучшие показатели у асфальтобетона с бутилкаучуковой резиновой крошкой. Проведены опытные работы на разработанном составе асфальтобетона. Полученные составы рекомендованы «Красноярскавтодору» для производственного внедрения на дорогах Красноярского края.

Ключевые слова: битум, асфальтобетон, полимерные отходы, физико-механические свойства, районы Сибири, полимербитумное вяжущее, ИК-спектры, дифрактограмма, минеральный порошок, щебень, песок

1. Введение

В связи с проектированием, строительством и эксплуатацией дорожных асфальтобетонных покрытий в районах Сибири, характеризующимися суровыми климатическими условиями, большое значение приобрела проблема повышения их надежности. Особенность условий эксплуатации материалов в этих районах заключается в том, что они характеризуются очень низкими зимними температурами и довольно высокими летними при большой продолжительности периода с температурой ниже 0 °C.

Столь жесткие погодные условия предъявляют высокие требования к материалам и конструкциям дорожных покрытий. А именно, они должны обладать необходимой для этих районов деформативностью на морозе и теплостойкостью при повышенных летних температурах. Асфальтовые материалы на битумном вяжущем не удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям, так как температурный интервал работоспособности битумов почти целиком находится в области положительных температур. Вопросами деформативности асфальтобетона посвящены работы [1-11].

Поэтому возникает необходимость в улучшении свойств битумов. Задача повышения качества битумов в настоящее время решается двумя путями: усовершенствование технологии производства битумов и совмещение битумов с различными добавками, повышающими их физико-механические свойства. Наиболее перспективным является способ улучшения битумов полимерными добавками. Этим способом можно либо значительно улучшить эксплуатационные свойства битума, либо получить новый материал с совершенно другими физико-механическими и химическими свойствами. Вопросами модификации свойств битумов занимаются [12-20].

Для улучшения качества битумов необходимо изменить его структурно-механические характеристики в направлении приближения их к показателям высокополимеров, отличающихся способностью сохранять высокую деформативность при достаточно низких отрицательных температурах и, наряду с этим, не размягчаться и не терять прочность при нагреве. В настоящее время проводят модификацию битума каучуками, латексами, полиэтиленом, регенератором резины и др.

Однако полимеры являются дорогими и дефицитными материалами. Поэтому весьма перспективным является применение отходов полимеров в составах дорожного асфальтобетона. Использование отходов полимеров для модификации битумного вяжущего позволяет повысить его эксплуатационные качества, решить важную экологическую проблему, связанную с утилизацией отходов, и снизить расход битума, что особенно

важно в настоящее время в условиях роста цен и дефицита нефтяного сырья. В работе также использовались минеральные отходы промышленного производства. Этими вопросами занимаются исследователи [21-22].

Целью настоящей работы являлось изучение возможности использования отходов полимеров заводов Сибири в составах полимербитумного вяжущего для дорожного асфальтобетона.

2. Материалы и методы

В качестве отходов полимеров в работе использовались:

1. Резиновая крошка на каучуках общего назначения, полученная путем измельчения старых автомобильных покрышек с единичными включениями корда Красноярского шиноремонтного завода. Гранулометрический состав резиновой крошки приводится в таблице 1.

Таблица 1 – Гранулометрический состав резиновой крошки

Размеры сит, мм	Частные остатки, %	Полные остатки, %	Прошло через сито, %
2,5	-	-	100
1,25	56,0	56,0	44,0
0,63	17,0	73,0	27,0
0,315	16,0	89,0	11,0
0,14	8,9	97,9	2,1
0,071	2,0	99,9	0,1
0	0,1	100,0	0

2. Бутилкаучуковая резиновая крошка, полученная путем измельчения пробок от старых медицинских пузырьков. Гранулометрический состав бутилкаучуковой резиновой крошки приводится в таблице 2.

Таблица 2 – Гранулометрический состав бутилкаучуковой резиновой крошки

Размеры сит, мм	Частные остатки, %	Полные остатки, %	Прошло через сито, %
1,25	27,75	27,75	72,25
0,63	51,25	79,0	21,00
0,315	19,75	98,75	1,25
0,14	1,25	100	-
0,071	0	-	-
0	0	-	-

3. Коагулум девулканизированный – отход каучукового производства Красноярского завода синтетического каучука. По внешнему виду это куски резиноподобной смеси.

4. Атактический полипропилен – является побочным продуктом при производстве полипропилена на Томском химкомбинате. Атактический полипропилен выпускается в виде пластин, попудренных тальком. Атактический полипропилен представляет собой каучукоподобное вещество с молекулярной массой 20000 – 40000 а.е.м., имеет аморфную структуру. Свойства атактического полипропилена представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Свойства атактического полипропилена

Наименование показателей	Свойства
1. Внешний вид	Аморфное вещество светло-серого цвета
2. Содержание летучих веществ, %	3
3. Зольность, %	3
4. Содержание изотактической фракции, %	40
5. Глубина погружения иглы при 25 °C, градусы пенетрации	60
6. Точка плавления, °C	130
7. Вязкость при 180 °C, Спз	10000

Выбор этих отходов для модификации битумного вяжущего объясняется тем, что резиновая крошка обладает органическим содержанием с компонентами битума и при их физико-механическом взаимодействии получается новый материал, выгодно отличающийся от битума. Легкие масляные фракции битума при введении резины не испаряются, а входят в нее за счет ее частичного набухания и растворения. При этом происходит девулканизация резины. Это оказывает стабилизирующее действие на битум, предохраняет его от преждевременного старения. Большое количество отходов образуется при производстве синтетических каучуков. Использование отходов каучукового производства в виде коагулума является также эффективным направлением при получении полимербитумных вяжущих для асфальтобетона, так как совмещение его с битумом не вызывает затруднений. Атактический полипропилен относится к наименее реакционноспособному классу полиолефинов, то есть он менее подвержен действию различных факторов, включая атмосферные. Также атактический полипропилен имеет наиболее широкое распространение из отходов полиолефинов. Как

правило, полиолефины отличаются низкой температурой хрупкости. Эти виды полимеров наименее дефицитны и сравнительно дешевые.

5. В качестве вяжущего в асфальтобетоне применялся дорожный битум марки БНД 60/90 Ачинского нефтеперерабатывающего завода. Свойства битума приводятся в таблице 4.

Таблица 4 – Свойства битума БНД 60/90

Наименование показателей	Свойства
1. Температура размягчения по методу «Кольцо и шар», °C	50
2. Глубина проникания иглы, при 25 °C, градусы пенетрации	80
3. Растворимость, см, при 25 °C	75
при 0 °C	7,5
4. Температура хрупкости по Фраасу, °C	- 15

6. В качестве наполнителя в асфальтобетоне применялась известняковая мука – отход производства Красноярского химико-металлургического завода (ХМЗ). Химический состав известняковой муки приводится в таблице 5.

Таблица 5 – Химический состав и известняковой муки

Химический состав, %				
CaCO ₃	CaO	LiO ₂	Свободная щелочь	Сумма
98,16	1,4	0,24	0,2	100

Как видно из таблицы, основным минералом известняковой муки является минерал кальцит, который входит в состав карбонатных горных пород, что должно обеспечить хорошее сцепление битума с минеральным порошком за счет процессов хемосорбции на границе раздела фаз битум – каменный материал.

Также проводился рентгенографический анализ известняковой муки. Дифрактограмма известняковой муки приводится на рисунке 1.

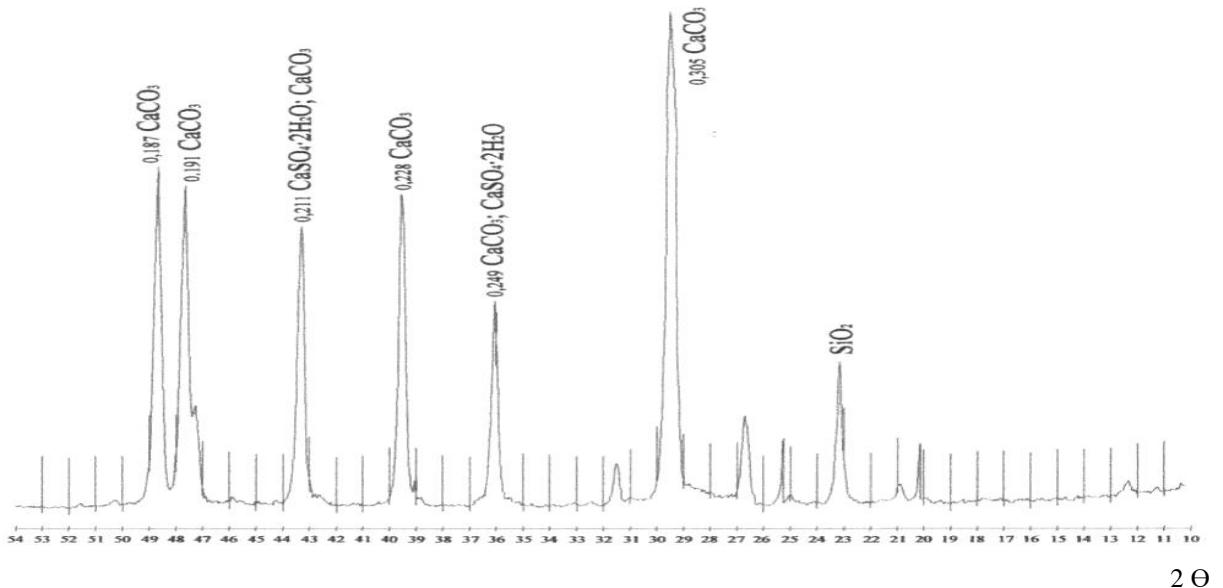


Рис. 1 Дифрактограмма известняковой муки

Анализ дифрактограммы показал, что основным минералом известняковой муки является также кальцит, что подтверждает результаты химического анализа.

Определялся зерновой состав известняковой муки. Результаты испытаний в сравнении с требованиями ГОСТ [23] приводятся в таблице 6. В таблице даны среднеарифметические значения, полученные при испытании трех образцов.

Таблица 6 - Зерновой состав известняковой муки

Размер сит, мм	Частные остатки, г	Частные остатки, %	Полные остатки, %	Прошло через сито, %	Требования ГОСТ
1,25	0	0	0	100	Не менее 100

0,63	0	0	0	100	-
0,315	0,01	0,01	0,01	99,99	Не менее 90
0,16	5,81	5,81	5,82	94,18	-
0,071	14,78	14,78	20,60	79,40	От 70 до 80
Дно	79,40	79,40	100,00	0	-
Сумма	100	100			

Как видно из таблицы, по зерновому составу известняковая мука отвечает требованиям ГОСТ. В таблице 7 показаны физико-механические свойства известняковой муки в сравнении с требованиями ГОСТ для минерального порошка марки МП-1.

Таблица 7 – Физико-механические свойства известняковой муки

Наименование показателей	Значение	Требования ГОСТ
1. Пористость, %	33,21	Не более 35
2. Набухание образцов из смеси порошка с битумом, %	0,92	Не более 2,5
3. Влажность, % по массе	0,24	Не более 1,0
4. Битумоемкость, г	65	-
5. Суммарная удельная эффективная активность естественных радионуклидов, А _{эфф} , Бк/кг	27	Не более 740

Как видно из таблиц 5, 6 и 7, порошок ХМ3 отвечает требованиям ГОСТ для минеральных порошков марки МП-1 и может применяться при изготовлении асфальтобетона для строительства дорог в пределах территории населенных пунктов и зон перспективной застройки.

7. В качестве крупного и мелкого заполнителей применялись щебень и дробленый песок Березовского карьера г. Красноярска.

Определение физико-механических свойств отходов полимеров, битумов, минеральных заполнителей, полимербитумного вяжущего и асфальтобетона проводилось по методикам соответствующих ГОСТов.

Для изучения взаимодействия битума с полимерными отходами применялся метод ИК-спектроскопии. ИК-спектры снимались на спектрофотометре «Specord 75 IR» в области 400 - 4000 см⁻¹, где проявляются колебания связей различных групп битумов. Условия записи спектров подобраны таким образом, при которых аппаратные искажения сведены к минимуму. Съемку образцов проводили в тонком слое между пластинками из КВг. Твердые образцы готовили в матрице бромистого калия с фиксированной навеской вещества. На рисунках ИК-спектров по горизонтали отложены длины волн, по вертикали – интенсивность поглощения веществом инфракрасной части спектра.

3.Результаты

Вначале изучалось влияние выбранных полимерных отходов на свойства битума. С целью изучения характера процессов, происходящих при взаимодействии битума с полимерными отходами, были проведены исследования методом ИК-спектроскопии образцов исходных материалов: битума и полимерных отходов, а также композиционных вяжущих, полученных на их основе.

На рисунке 2 показан ИК-спектр битума БНД 60/90. Этот спектр представлен в основном полосами поглощения колебаний CH₂ – и CH₃ – алифатических групп в области 2880 - 2960 см⁻¹ и 1375 - 1460 см⁻¹. Анализ их интенсивностей, а также наличие дуплета полос 720 и 745 см⁻¹ свидетельствует о том, что основной составляющей битума являются парафиновые углеводороды с нечетным числом углеводородных атомов в цепи. Наряду с парафиновыми цепочками нормального строения в составе исследуемого битума в значительных количествах присутствуют нафтеново-ароматические структурные фрагменты. Об этом свидетельствует наличие полос поглощения 3060, 1600, 1515, 810, и 870 см⁻¹ в спектре битума.

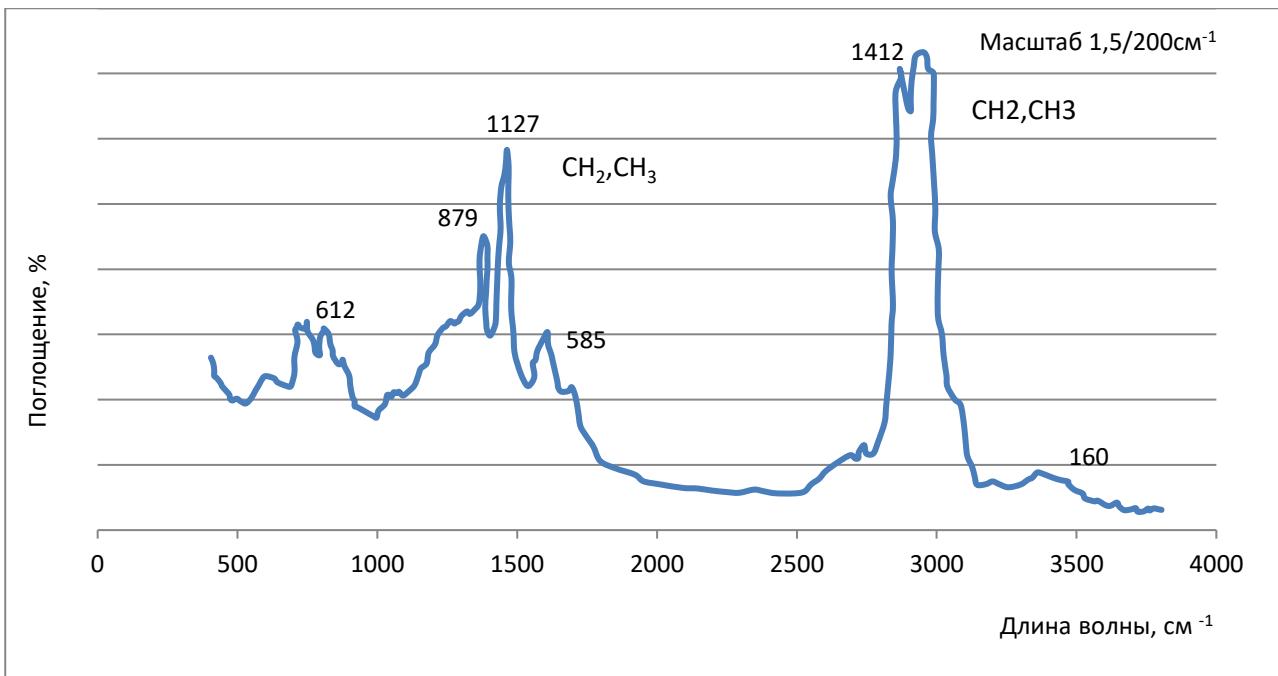


Рис. 2 ИК-спектр битума БНД 60/90

Кислородсодержащие продукты представлены в структуре битума функциональными группами:

- OH (полоса поглощения 3380 см^{-1});
- карбонильными (сложная полоса поглощения 1695 см^{-1}), по-видимому, входящими в состав кетонов;
- эфирными (полоса поглощения $1030 - 1300\text{ см}^{-1}$).

Необходимо отметить, что количество кислородсодержащих продуктов в битуме, как показывают результаты спектроскопических исследований, очень мало – 1,7 – 2,0 %.

На рисунке 3 представлены ИК-спектры исходного битума (спектр «а») и смеси битума с бутилкаучуковой крошкой (спектр «б»). Сравнение спектров показывает их значительное различие в области $1500 - 400\text{ см}^{-1}$. В спектре «б» присутствуют полосы поглощения при $1015, 450$ и 1225 см^{-1} и дуплет полос $1370 - 1380\text{ см}^{-1}$, отсутствующие в спектре исходного битума. Наблюдаемые полосы присутствуют в спектре бутилкаучука, что доказывает внедрение этой добавки в битум. Анализ контуров полос свидетельствует о наличии химической связи фрагментов бутилкаучуковой крошки с функциональными группами битума.

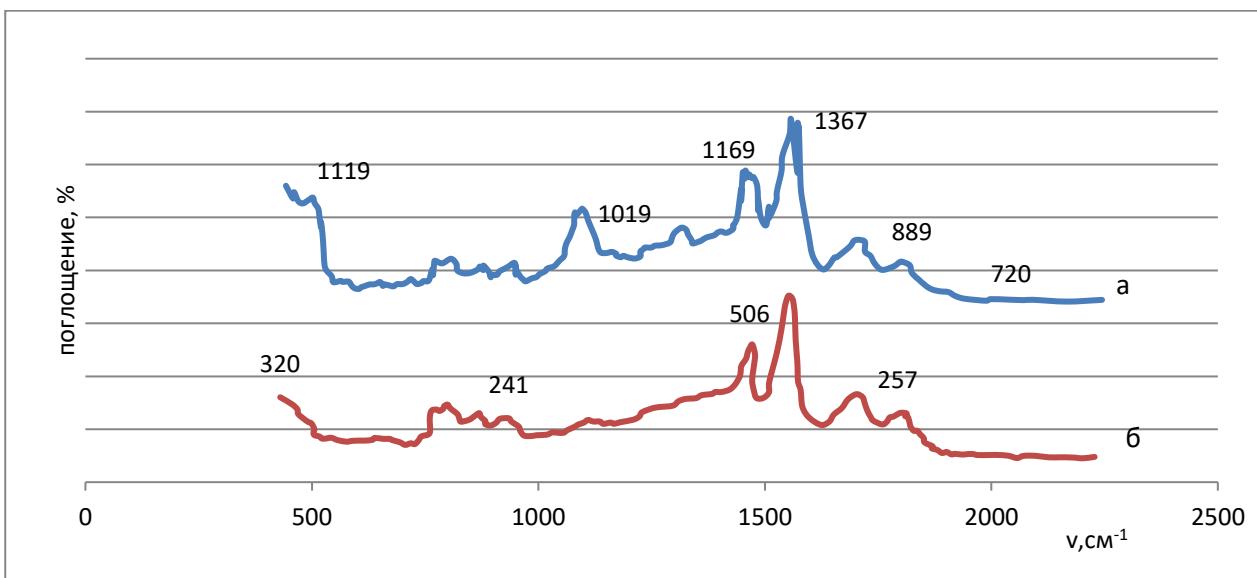


Рис. 3 ИК-спектр битума БНД 60/90 с 7% бутилкаучуковой крошки

На рисунке 4 приведены спектры поглощения битума (спектр «а») и смеси битума с 7% атактического полипропилена (спектр «б»). Прежде всего, следует отметить, что полученный образец смеси неоднороден по объему. Свидетельством последнего служит плохая воспроизводимость ИК-спектров проб, взятых из разных точек. Это может быть обусловлено тем, что полученный продукт является, в основном, механической смесью битума и добавки. В какой-то мере доказательством этого предположения служит значительное рассеяние

(перепад фона) при записи спектра. В то же время, изменения соотношения интенсивности полос в области 720 - 870 см^{-1} , а также 1380 и 1465 см^{-1} , свидетельствует о наличии в составе продукта химически связанных с битумом CH_3 - групп. Однако вопрос о характере связи однозначно решить трудно, поскольку основная масса на наш взгляд является механической смесью.

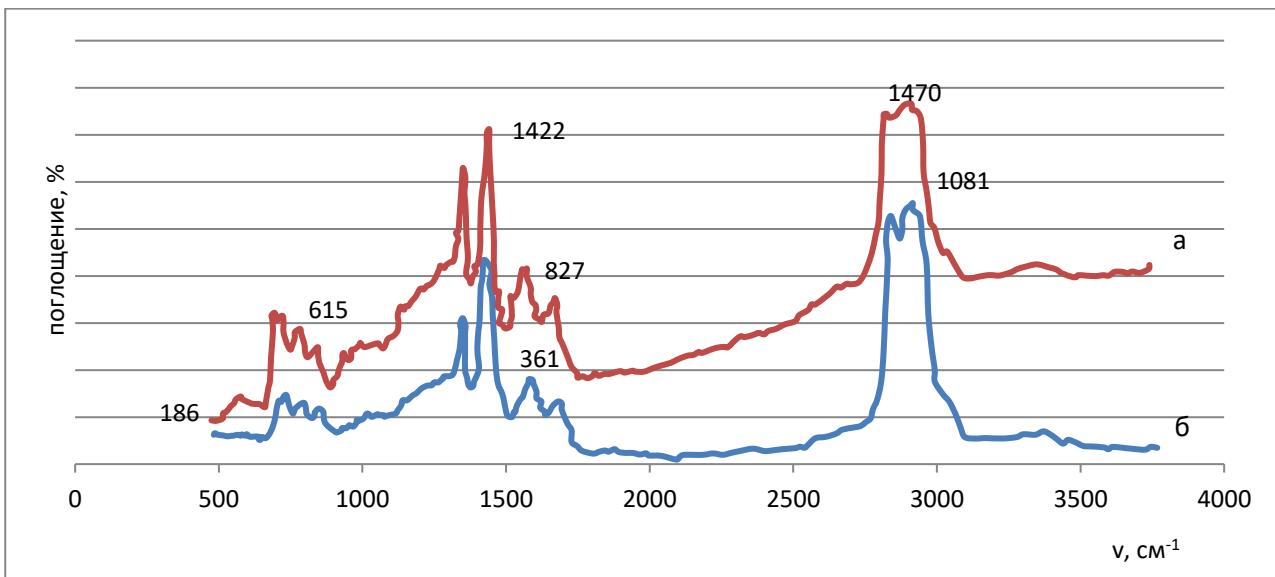


Рис. 4 ИК-спектр битума (спектр «а») и смеси битума с 7% атактического полипропилена (спектр «б»)

На рисунке 5 представлены ИК-спектры резиновой крошки, на рисунке 6 смеси битума с 8% резиновой крошки, а на рисунке 7 спектры коагулюма девулканизированного и на рисунке 8 спектры битума с 8% коагулюма. Анализируя полученные спектры, можно сделать вывод о том, что эти отходы химически не взаимодействуют с битумом, так как на спектрах битума с этими отходами не появляется новых полос поглощения, характерных для отходов, а наблюдаются только полосы, характерные для битума. Появляющиеся полосы столь незначительны, что они не могут соответствовать образованию новых химических соединений. А тот факт, что полосы поглощения, соответствующие полимерам, не наблюдаются на ИК-спектрах смесей, объясняется тем, что концентрация полимеров в битуме незначительна и основную массу составляет битум. Таким образом, составы битума с резиновой крошкой и коагулюром девулканизированным представляют собой физические смеси и являются гетерогенными двухфазными системами.

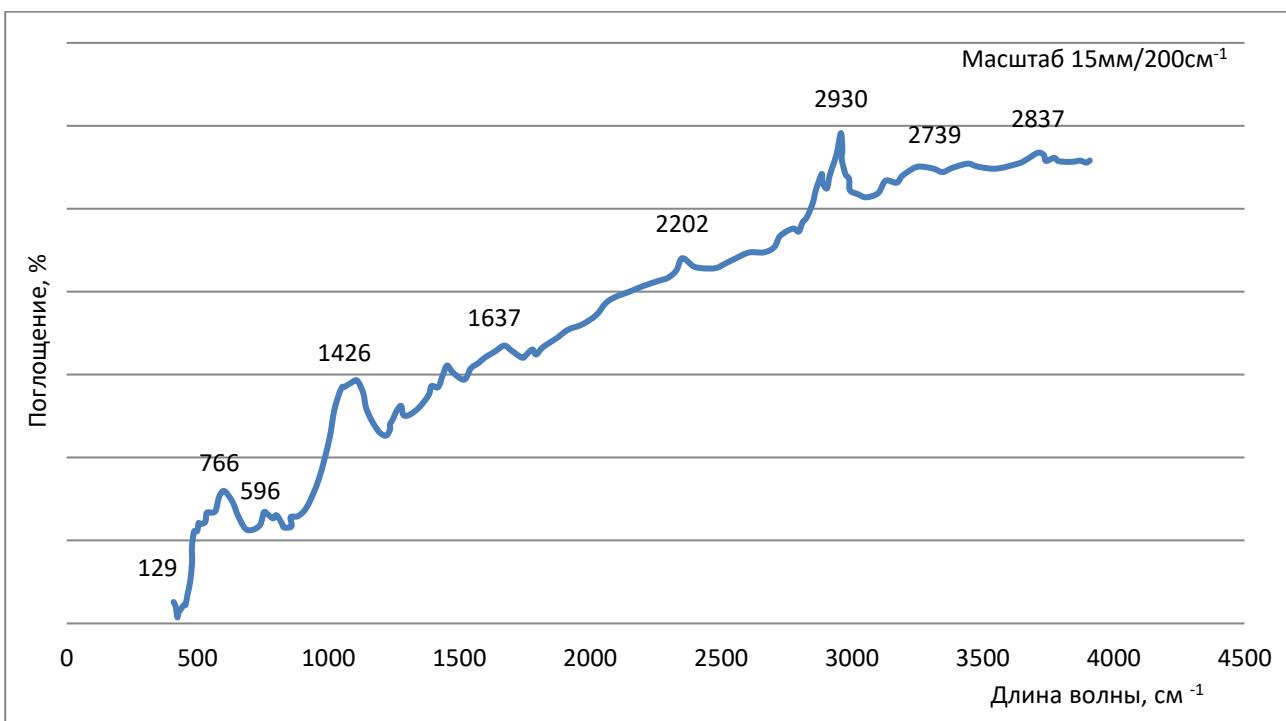


Рис. 5 ИК-спектр резиновой крошки

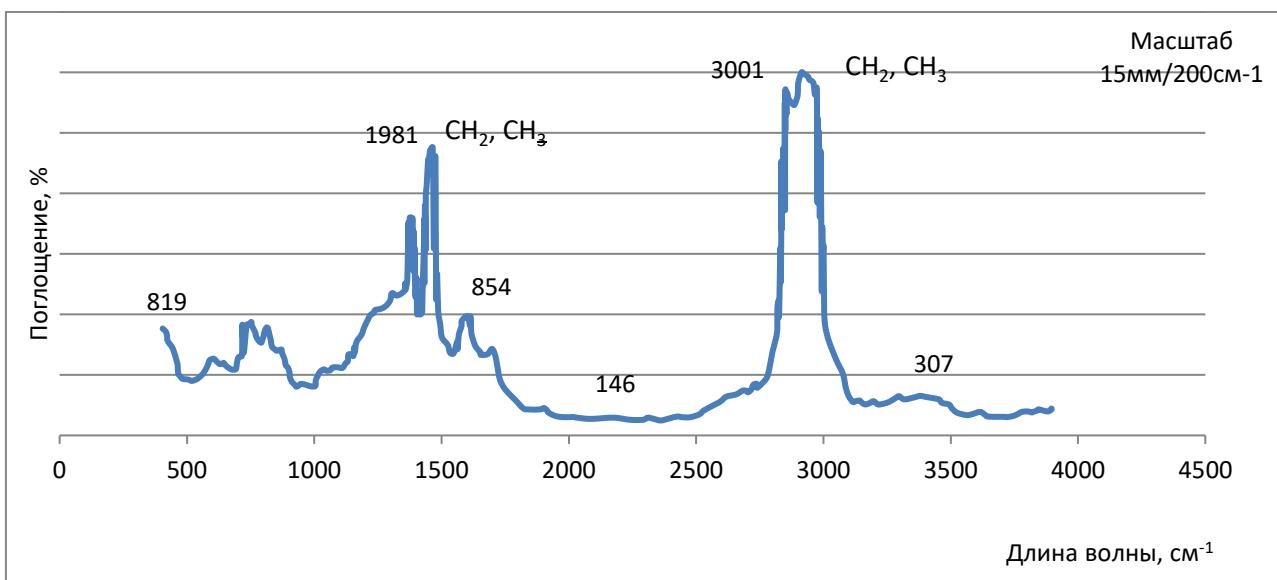


Рис. 6 ИК- спектр смеси битума БНД 60/90 с 8% резиновой крошки

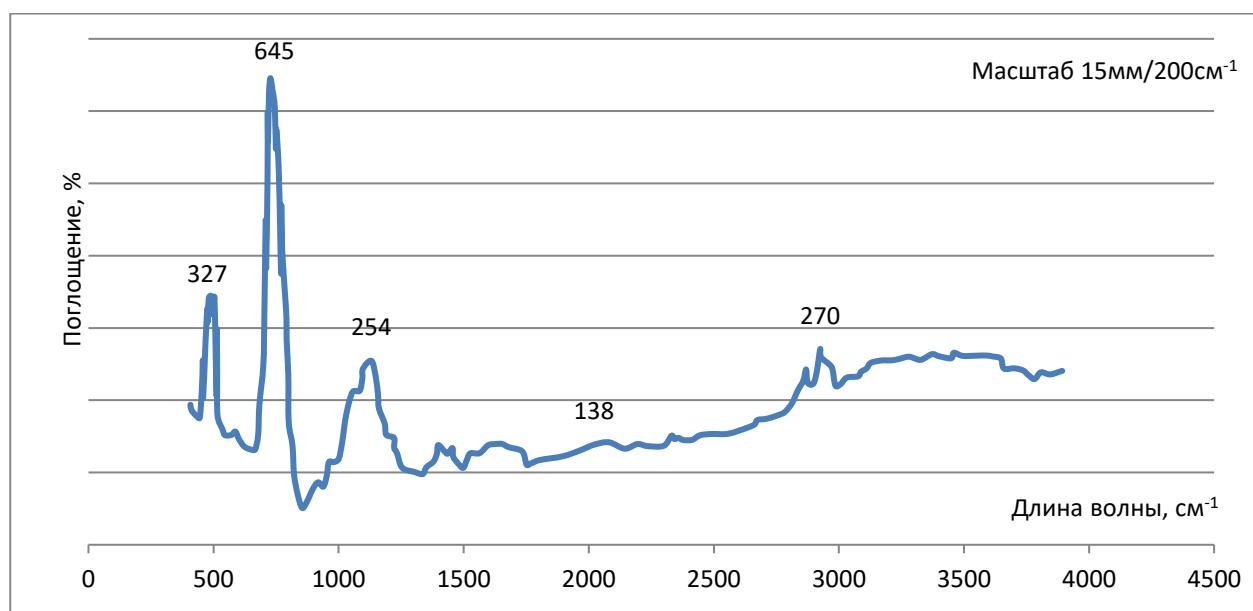


Рис. 7 ИК- спектр коагулюма девулканализированного

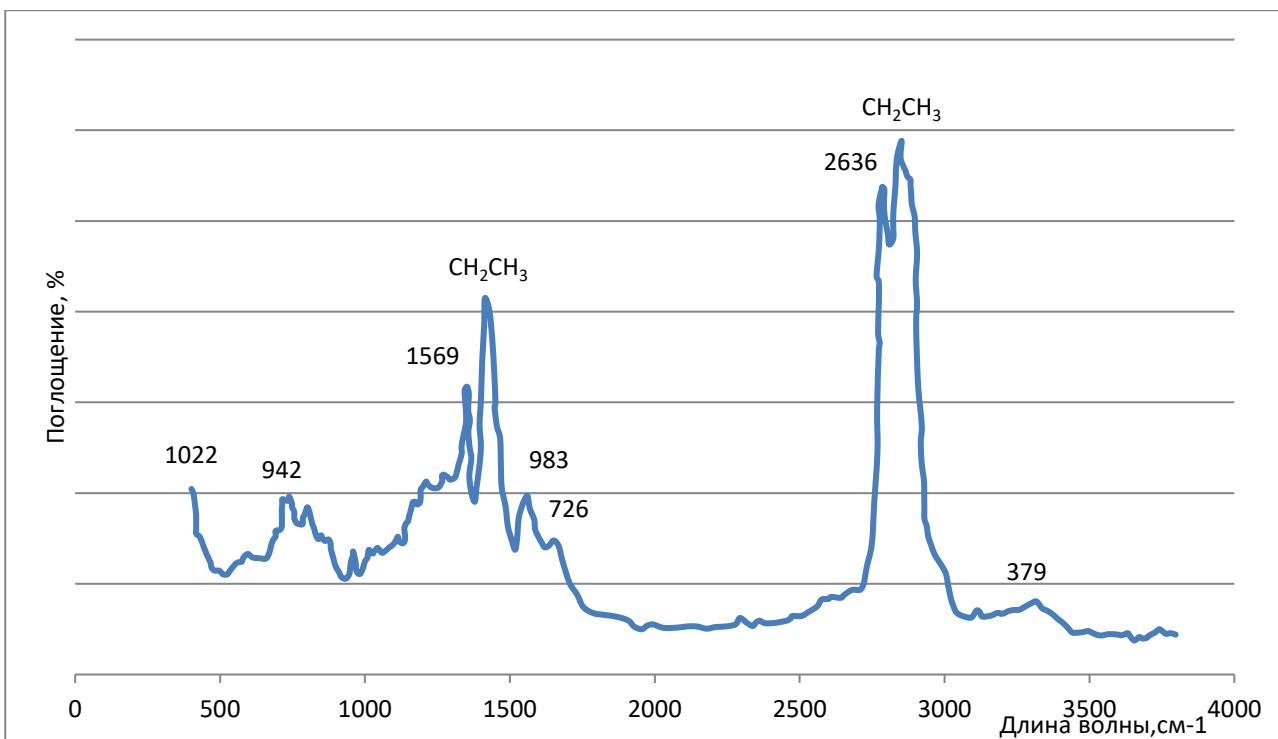


Рис. 8 ИК-спектр смеси битума БНД 60/90 с 8% коагулумом девулканизированного

На выбранных полимерных отходах были приготовлены составы полимербитумных вяжущих. Для этого в битум вводилось различное количество отходов. Минимальная дозировка отходов составляла 2% от массы битума, а максимальная дозировка определялась технологической совместимостью их с битумом и составляла 15 - 20 %.

Резиновую крошку предварительно просеивали через сито 5x5 мм, а коагулумом девулканизированный измельчали в крошку размерами 2 - 3 мм. Температура смешения битума с резиновой крошкой и коагулумом составляла 180 - 200 °C, время перемешивания 2 - 3 часа. Приготовление составов с атактическим полипропиленом и бутилкаучуковой резиновой крошкой проводилось следующим образом. В выпаренный и нагретый до температуры 160 - 180 °C битум вводили при непрерывном перемешивании необходимое количество полимеров. Добавление последующей порции проводилось после расплавления предыдущей. Общее время перемешивания битума с атактическим полипропиленом и бутилкаучуковой резиновой крошкой составляло 1,5 - 2 часа.

Исследование физико-механических свойств полимербитумного вяжущего складывалось из определения его деформативной способности при отрицательной температуре, которая характеризовалась температурой хрупкости, водопоглощением и стандартными характеристиками: температурой размягчения, пенетрацией и растяжимостью. Свойства полимербитумных композиций приводятся в таблице 8.

Таблица 8 – Свойства полимербитумных вяжущих

Количество (%) и вид добавки	Температура размягчения, °C	Пенетрация, °П		Растяжимость, см		Водопоглощение под вакуумом, % мас.	Температура хрупкости по Фраасу, °C
		при 25 °C	при 0 °C	при 25 °C	при 0 °C		
2 АПП	55,8	8,5	2,0	6,3	0,2	0,21	- 21,3
5 АПП	69,3	9,0	3,2	7,2	0,4	0,53	- 25,0
10 АПП	74,6	22,3	13,0	8,8	0,5	1,85	- 26,0
15 АПП	81,5	45,0	18,0	-	0,5	1,53	-
20 АПП	87,4	32,8	26,0	-	-	2,24	-
5 РК	48,5	11,0	6,5	5,0	0,3	0,5	- 19,0
10 РК	50,7	16,0	8,1	6,0	0,4	0,3	- 21,0
15 РК	67,0	22,0	7,4	8,0	0,3	0,04	- 20,0
5 К	50,8	7,0	4,0	3,5	0,2	0,9	- 18,0
10 К	66,3	9,0	5,0	4,8	0,3	0,4	- 19,0
15 К	75,4	10,0	6,0	5,4	0,4	0,3	- 20,0
5 БК	60,5	13,8	11,3	12,3	2,8	0,2	- 25,0
10 БК	71,2	16,7	7,8	14,2	4,6	0,3	- 28,0
15 БК	78,4	26,9	6,5	15,6	6,9	0,4	- 32,0

где: АПП – атактический полипропилен; РК – резиновая крошка; К – коагулюм девулканизированный; БК – бутилкаучуковая резиновая крошка.

Проведенные исследования позволили сделать выводы о том, что введение всех полимерных отходов приводит к увеличению температуры размягчения и снижению температуры хрупкости битумов. Снижение водопоглощения происходит до определенных дозировок полимерных отходов. Составы с большой дозировкой отходов имеют большое водопоглощение. Это происходит, вероятно, за счет плохого распределения большого количества отходов в смеси и в получении неоднородных составов. Лучшие показатели получились у составов с бутилкаучуковой крошкой и атактическим полипропиленом. На основании проведенных исследований с учетом получения наилучших показателей полимербитумного вяжущего с наименьшей его стоимостью были выбраны следующие оптимальные составы, на которых готовился горячий мелкозернистый асфальтобетон для верхних слоев дорожных одежд. Количество полимербитумного вяжущего подбиралось опытным путем. Составы полимербитумных вяжущих приводятся в таблице 9.

Таблица 9 – Составы полимербитумных вяжущих

Номера составов	1	2	3	4	5
Количество и вид полимерной добавки	4 РК	5 АПП	5 К	5 БК	-
Количество полимербитумного вяжущего, %	7,5	7,5	7,0	7,0	6,0

Для сравнения свойств готовился состав асфальтобетона на «чистом» битуме без полимерных добавок (состав № 5).

Подбор минеральной части асфальтобетона проводился по предельным кривым для плотных смесей с коэффициентом сбега 0,7 - 0,9. При подборе составов исходили из необходимости получения плотных смесей при минимальном содержании минерального порошка и битума. Состав минеральной части асфальтобетона после подбора получился следующим (% мас.): щебень – 45,3; песок – 44,8; минеральный порошок – 9,9. Технологический процесс приготовления асфальтополимербетона в лабораторных условиях состоял из подготовки битума и приготовления полимербитумного вяжущего, рассева и нагрева минеральных материалов, дозирования ингредиентов и их смешения. Подготовка битума заключалась в его расплавлении, обезвоживании путем нагрева при 100 – 110 °C до прекращения выделения пены и нагреве до температуры 150 - 160 °C. Приготовление полимербитумного вяжущего проводилось путем перемешивания разогретого до рабочей температуры битума с полимерными отходами.

Подготовка минеральных составляющих заключалась в подогреве щебня и песка до 180 °C. Минеральный порошок не подогревался. Температура перемешивания полимербитумного вяжущего с минеральными материалами составляла 160 - 170 °C. Определение свойств асфальтополимербетона проводилось государственным ГОСТам. Свойства подобранных составов асфальтополимербетона в сравнении с требованиями ГОСТ для II –ой дорожно-климатической зоны, типа А, I-ой марки и со свойствами асфальтобетона на «чистом» битуме приводятся в таблице 10.

Таблица 10 – Свойства асфальтобетонов

Наименование показателей	Номера составов					Норма по ГОСТ
	1	2	3	4	5	
1.Предел прочности при сжатии, МПа: при 20 °C	4,3	3,0	3,55	3, 65	2,75	Не менее 2,5
при 50 °C	1,15	1,1	1,17	1,25	0,95	Не менее 1,1
при 0 °C	10,5	9,63	10,87	8,75	11,5	Не более 11,0
2. Коэффициент водостойкости	0,89	0,85	0,85	0,97	0,79	Не менее 0,9
3. Коэффициент водостойкости при длительном водонасыщении	0,85	0,79	0,82	0,87	0,72	Не менее 0,85
4. Водопоглощение, % объема	0,76	0,66	0,71	0,57	1,01	-

4. Дискуссии

Из таблицы 10 видно, что прочности при 20 °C все составы асфальтополимербетона отвечают требованиям ГОСТ и имеют лучшие показатели по сравнению с асфальтобетоном на «чистом» битуме. Прочность при 50 °C, которая характеризует его теплостойкость и способность к образованию колес в летнее время, больше у состава с бутилкаучуковой резиновой крошкой. Также прочность при 0 °C, которая характеризует его деформативную способность при отрицательной температуре, больше у составов с бутилкаучуковой резиновой крошкой. По коэффициенту водостойкости не отвечают требованиям ГОСТ составы с резиновой крошкой, атактическим полипропиленом и коагулумом. Таким образом, на основании проведенных исследований можно выбрать асфальтополимербетон на основе бутилкаучуковой резиновой крошкой, который по всем показателям отвечает требованиям ГОСТ и намного превосходит эти показатели для обычного асфальтобетона.

На разработанном составе асфальтобетона были проведены опытные работы. В лабораторных условиях был приготовлен асфальтобетон, который укладывали в предварительно очищенные от грязи и пыли выбоины в асфальтобетонном покрытии на территории СФУ. В ходе проведения работ установлено, что асфальтобетонные смеси заполняют выбоины в дорожных покрытиях плотным и однородным слоем и хорошо прилипают к старому асфальтобетону. Наблюдения за опытным участком за истекший период показали отсутствие визуальных изменений в покрытиях. Полученный состав асфальтобетона был рекомендован «Красноярскавтодору» для производственного внедрения на дорогах Красноярского края.

Выводы

1. Проведено исследование полимерных отходов заводов Сибири. Изучались резиновая крошка на каучуках общего назначения, полученная путем измельчения старых автомобильных покрышек, бутилкаучуковая резиновая крошка шиноремонтного завода г. Красноярска, коагулум девулканизированный Красноярского завода синтетического каучука и атактический полипропилен химкомбината г. Томска.
2. С применением метода ИК-спектроскопии изучен характер взаимодействия битума с отходами. Установлено, что только бутилкаучуковая резиновая крошка химически взаимодействует с битумом. С остальными отходами битум образует гетерогенные двухфазные системы.
3. С применением выбранных полимерных отходов приготовлены составы полимербитумного вяжущего для асфальтобетона. После анализа свойств вяжущих, были выбраны оптимальные составы.
4. С использованием местных минеральных заполнителей и выбранных составов полимербитумных вяжущих были рассчитаны и приготовлены составы асфальтобетона для верхних слоев дорожной одежды. Расчет составов проводился по предельным кривым для плотных смесей с коэффициентом сбега 0,7 - 0,9.
5. В качестве минерального порошка в асфальтобетоне применялся отход производства Красноярского химико-металлургического завода. Состав этого отхода изучался с применением химического и рентгенографического анализов.
6. Из приготовленной асфальтобетонной смеси были отформованы образцы, которые испытывались на основные физико-механические показатели. Анализ полученных данных показал, что все полимерные отходы улучшают свойства асфальтобетона на «чистом» битуме и превышают требования ГОСТ.
7. Лучшие показатели по всем свойствам показал асфальтобетон с бутилкаучуковой резиновой крошкой. Данный состав асфальтобетона был приготовлен в лабораторных условиях и уложен в дорожное покрытие на территории СФУ. Наблюдения за опытным участком показали, что новый слой из опытного состава хорошо прилипает к старому покрытию и на нем не появились трещины после года эксплуатации.
8. Разработанный состав асфальтополимербетона был рекомендован «Красноярскавтодору» для внедрения на дорогах Красноярского края.

Рекомендации

1. Rahman, A., Huang, H., Ding, H., Xin, C., Lu, Y., T.: Fatigue performance of interface bonding between asphalt pavement layers using four-point shear test set-up. International Journal of Fatigue, vol. 121, pp. 181-190 (2019).
2. Jaczewski, M., Judycki, J., Jaskula, P., T: Asphalt concrete subjected to long-time loading at low temperatures - Deviations from the time-temperature superposition principle. Construction and Building Materials, vol. 202, pp. 426-439 (2019).
3. Ameri, M., Mansourkhaki, A., Daryaee, D., T.: Evaluation of fatigue behavior of asphalt binders containing reclaimed asphalt binder using simplified viscoelastic continuum damage approach. Construction and Building Materials, vol. 202, pp. 374-386 (2019).
4. Li, J., Liu, J., Zhang, W., Liu, G., Dai, L., T.: Investigation of thermal asphalt mastic and mixture to repair potholes. Construction and Building Materials , vol. 201, pp. 286-294 (2019).
5. Kocherga, V.G., Kulik E.P.: Mixes for emergency repair of wet pavements (in Russian). International Scientific and Technical Journal 3, 42-43 (2006)
6. Завьялов, М. А.: Функциональное состояние дорожного асфальтобетонного покрытия (in Russian). Известия высших учебных заведений. Строительство: научно-теоретический журнал 6, 92-97 (2007).
7. Василовская, Г.В., Назиров Д.Р.: Сероасфальтобетон (in Russian). Журнал Сибирского федерального университета 6(4), 696-703 (2011).

8. Ковалев Н.С., Т: Улучшение свойств асфальтобетона и противогололедных асфальтобетонных покрытий, Воронеж (2017).
9. Wang, Y., Chong, D., Wen, Y.: Quality verification of polymer-modified asphalt binder used in hot-mix asphalt pavement construction. *Construction and building materials.*, Biol. 147, 157-166 (2017). doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.196
10. Alexandrov, D.Y.: Prospects for Application of Complex-Modified Sand Asphalt Concrete In Road Construction. *Science and technique* 16(4), 315-323 (2017). doi:10.21122/2227-1031-2017-16-4-315-323
11. Judycki, J., Jaskula, P., Dolzycki, B., Pszczola, M., Jaczewski, M., Rys, D., Stienss, M.: Investigation of low-temperature cracking in newly constructed high-modulus asphalt concrete base course of a motorway pavement. *Road materials and pavement design* 16, 362-388 (2015). doi:10.1080/14680629.2015.1029674
12. Wan, Y., Jia, J., T.: Nonlinear dynamics of asphalt–screed interaction during compaction: Application to improving paving density. *Construction and Building Materials* vol. 202, pp. 363-373. (2019).
13. Franesqui, M., Yepes, J., T.: García-González Improvement of moisture damage resistance and permanent deformation performance of asphalt mixtures with marginal porous volcanic aggregates using crumb rubber modified bitumen. *Construction and Building Materials* vol. 201, pp. 328-339 (2019).
14. Slebi-Acevedo, C., Lastra-González, P., Pascual-Muñoz, P., Castro-Fresno, D., T: Mechanical performance of fibers in hot mix asphalt: *Construction and Building Materials* vol. 200, pp. 756-769 (2019).
15. Mohammadafzali, M., Ali, H., Sholar, G., Rilko, A.: Effects of rejuvenation and aging on binder homogeneity of recycled asphalt mixtures. *Journal of Transportation Engineering Part B* (145), Article number 04018066 (2019).
16. Brasileiro, L., Moreno-Navarro, F., Tauste-Martinez, R.; Matos, J.: Reclaimed Polymers as Asphalt Binder Modifiers for More Sustainable Roads: A Review. *Sustainability* 11(3), (2019). doi: 10.3390/su11030646
17. Petkova-Slipets, R.; Zlateva, P.: Thermal properties of a new pavement material for using in road construction. *Civil and environmental engineering* 14(2), 99-104 (2018). doi:10.2478/cee-2018-0013
18. AlMansob, R., Ismail, A., T.:Sustainable Pavement Using Asphalt Modified with Exoxidized Natural Rubber. Sustainable pavement using asphalt modified with expoxidized natural rubber. (2018).
19. Kwon, H., Lee, A., Lee, J., Park, N., Kim, G., Cho, B., Cho, S., Yu, S.: Characterization of liquid state sulfur polymer/epoxy blend as asphalt pavement materials. *Journal of industrial and engineering chemistry* 53, 386-391 (2017). doi:10.1016/j.jiec.2017.05.010
20. Zani, L., Giustozzi, F., Harvey, J.: Effect of storage stability on chemical and rheological properties of polymer-modified asphaltbinders for road pavement construction. *Construction and building materials* 145, 326-335 (2017). doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.014.
21. Shadmani, A., Tahmouresi, B., Saradar, A., Mohseni, E.:Durability and microstructure properties of SBR-modified concrete containing recycled asphalt pavement. *Construction and building materials* 185, 380-390 (2018). doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.07.080
22. Chomicz-Kowalska, A., Iwanski, M., Mrugala, J, T: Basic Performance of Fibre Reinforced Asphalt Concrete with Reclaimed Asphalt Pavement Produced in Low Temperatures with Foamed Bitumen. *World multidisciplinary civil engineering-architecture-urban planning symposium-wmcaus*, Prague (2009). doi:10.1088/1757-899X/245/3/032092