

УДК: 691, 624.138

DOI: 10.52409/20731523\_2023\_4\_328

EDN: MVPXUQ



## Физико-механические характеристики резино-битумных вяжущих

Д.С. Смирнов<sup>1</sup>, П.Е. Буланов<sup>1</sup>, Л.Р. Утяшева<sup>2</sup><sup>1</sup>Казанский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Казань, Российская Федерация<sup>2</sup>ГКУ «Главтатдортранс», г. Казань, Российская Федерация

**Аннотация:** *Постановка задачи.* Постоянное повышение транспортной нагрузки и интенсивности движения приводит к снижению стойкости асфальтобетона к колееобразованию и другим дефектам. Применение резиновой крошки в дорожном строительстве является одним из перспективных методов утилизации отходов и повышения характеристик асфальтобетона.

Цель работы является исследование физико-механических свойств битума, модифицированного резиновой крошкой (резино-битумного вяжущего). Задачи: исследование влияния количества резиновой крошки и времени приготовления на физико-механические свойства резино-битумного вяжущего; определение состава резиновых крошек методом инфракрасной спектроскопии.

*Результаты.* В зависимости от количества резиновой крошки и времени приготовления изучены следующие физико-механические свойства резино-битумного вяжущего: глубина проникания иглы при 25 °С, температура размягчения по кольцу и шару, дуктильность при 0 °С, температура хрупкости по Фраасу. Определение количества целлюлозы и резиновой крошки проводилось методом инфракрасной спектроскопии.

*Выводы.* Установлено, что с введением добавок в битум в количестве от 8 до 24 % и времени приготовления от 5 до 15 минут: пенетрация при 25 °С уменьшилась на 14,92 %, 17,19 %, 12,90 %; температура размягчения повысилась на 12,47 %, 23,12 %, 18,23; дуктильность при 0 °С снизилась на 32,43 %, 23,68 %, 37,50 %; температура хрупкости повысилась на 31,25 %, 34,54 %, 35,71 % соответственно.

Установлено, что основным компонентом (не менее 80-90 % по массе) во всех трех образцах резиновой крошки является целлюлоза, о чем свидетельствует интенсивный характеристический пик 945 см<sup>-1</sup> пиранозных циклов, являющийся основной структурной единицей всех высокоуглеводов и, в частности, целлюлозы.

**Ключевые слова:** битум, резиновая крошка, резино-битумное вяжущее, ИК-спектроскопия, физико-механические характеристики

**Для цитирования:** Смирнов Д.С., Буланов П.Е., Утяшева Л.Р. Физико-механические характеристики резино-битумных вяжущих // Известия КГАСУ, 2023, № 4(66), с. 328-336, DOI: 10.52409/20731523\_2023\_4\_328, EDN: MVPXUQ

## Physical and mechanical characteristics of rubber-bitumen binders

D.S. Smirnov<sup>1</sup>, P.E. Bulanov<sup>1</sup>, L.R. Utyasheva<sup>2</sup><sup>1</sup> Kazan State University of Architecture and Engineering,  
Kazan, Russian Federation<sup>2</sup>SPI «Glavtattortrans», Kazan, Russian Federation

**Abstract:** *Problem statement.* A constant increase in traffic load and traffic intensity leads to a decrease in the resistance of asphalt concrete to rutting and other defects. The use of crumb

rubber in road construction is one of the promising methods for recycling waste and improving the characteristics of asphalt concrete.

The purpose of the work is to study the physical and mechanical properties of bitumen modified with crumb rubber (rubber-bitumen binder). The objectives are to study the influence of the amount of crumb rubber and preparation time on the physical and mechanical properties of rubber-bitumen binder; determine the composition of rubber crumbs using infrared spectroscopy.

*Results.* Depending on the amount of rubber crumb and preparation time, the following physical and mechanical properties of the rubber-bitumen binder were studied: needle penetration depth at 25 °C, softening temperature along the ring and ball, ductility at 0 °C, Fraas brittleness temperature. Determination of the amount of cellulose and crumb rubber was carried out by infrared spectroscopy.

*Conclusions.* It has been established that with the introduction of additives into bitumen in the amount of 8 to 24% and preparation time of 5 to 15 minutes: penetration at 25 °C decreased by 14.92%, 17.19%, 12.90%; the softening temperature increased by 12.47%, 23.12%, 18.23; ductility at 0 °C decreased by 32.43%, 23.68%, 37.50%; the brittleness temperature increased by 31.25%, 34.54%, 35.71% respectively.

It has been established that the main component (at least 80-90% by weight) in all three samples of rubber crumb is cellulose, as evidenced by the intense characteristic peak of 945 cm<sup>-1</sup> of pyranose cycles, which is the main structural unit of all high-carbohydrates and, in particular, cellulose.

**Keywords:** bitumen, rubber crumb, rubber-bitumen binder, IR spectroscopy, physical and mechanical characteristics

**For citation:** Smirnov D.S., Bulanov P.E., Utyasheva L.R. Physical and mechanical characteristics of rubber-bitumen binders // News KSUAE, 2023, № 4(66), с. 328-336, DOI: 10.52409/20731523\_2023\_4\_328, EDN: MVPXUQ

## 1. Введение

Асфальтобетонная смесь, состоящая из битумного вяжущего и минеральных заполнителей, является наиболее распространенным дорожно-строительным материалом для строительства покрытий автомобильных дорог [1-3]. Долговечность асфальтобетонного покрытия зависит от реологических свойств битумного вяжущего. Постоянное повышение транспортной нагрузки и интенсивности движения требует улучшения адгезионных и когезионных свойств битума путем его модификации различными полимерными добавками [4, 5].

Использование переработанных материалов в дорожном строительстве является одним из наилучших вариантов методов утилизации отходов и повышения характеристик строительных материалов дорожного назначения. Из переработанных материалов и отходов промышленности в асфальтобетонных смесях в основном применяются: шлаки, золы уноса, дробленый кирпич, пластмасса, каучук, отходы стекла, резинового порошка и т.д. [6, 7].

Среди модифицированных битумных вяжущих особое внимание заслуживают резино-битумные вяжущие, имеющие преимущества как с технической, так и экологической стороны. При производстве резино-битумного вяжущего, частицы резиновой крошки (обычно 15-20 %) смешивают с горячим битумом. Легкие фракции битума поглощаются резиновой крошкой, что приводит к ее набуханию [8]. При воздействии более жестких условий приготовления (высоких температур и продолжительного времени) происходит растворение резиновой крошки в битуме [9].

Увеличение количества изношенных шин является глобальной экологической проблемой [10, 11]. Ежегодно в мире производится около миллиарда шин [12]. Исследования показали, что модификация асфальтобетонных смесей резиновой крошкой для покрытий автомобильных дорог имеет ряд преимуществ: уменьшение толщины слоя; повышение срока службы и высокотемпературных характеристик асфальтобетона;

снижение уровня шума до 70 %; снижение затрат на техническое обслуживание; улучшение экологических проблем и т.д. [13, 14].

Производство битума, модифицированного резиновой крошкой, имеет два метода приготовления [15]. Первый метод – это «сухая технология», при котором модификатор из резиновой крошки используется для замены 1-3 % массы заполнителя в асфальтобетонной смеси. В сухом процессе резиновая крошка и асфальтобетонная смесь практически не взаимодействуют во время смешивания в асфальтосмесительной установке, поэтому данный метод не является предпочтительным. Второй метод – это «мокрая технология», которая была разработана Макдональдом в конце 1960-х годов. В этом методе к битуму или асфальтобетонной смеси добавляют резиновую крошку при начальной температуре 160 °С и в процессе смешения доводят температуру до 180-190 °С [10].

Целью работы является исследование физико-механических свойств битума, модифицированного резиновой крошкой (резино-битумного вяжущего).

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- исследование влияния количества резиновой крошки и времени приготовления на физико-механические свойства резино-битумного вяжущего;
- определение состава резиновых крошек методом ИК-спектроскопии.

## 2 Материалы и методы

В качестве вяжущего применен битум, соответствующий марке БНД 70/100 по ГОСТ 33133-2014 производства АО «ТАИФ-НК».

Результаты испытаний битума в соответствии с ГОСТ 33133-2014 представлены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-технические свойства битума марки БНД 70/100

№ п/п	Наименование показателя	Един. изм.	Фактические значения	Требования ГОСТ 33133-2014	Методы испытаний ГОСТ
1	2	3	4	5	6
1	Глубина проникания иглы, при 25 °С, 0,1 мм	мм	74	71-100	ГОСТ 33136
2	Температура размягчения по кольцу и шару, КиШ	°С	48	не ниже 47	ГОСТ 33142
3	Растяжимость, при 0 °С	см	3,8	не менее 3,7	ГОСТ 33138
4	Изменение температуры размягчения после прогрева	°С	6,2	Не более 7,0	ГОСТ 33140 ГОСТ 33142
5	Температура хрупкости	°С	-19	Не выше -18	ГОСТ 33143
6	Температура вспышки °С, не ниже	°С	230	230	ГОСТ 33141
7	Изменения массы образца после старения, %, не более	%	0,07	0,6	ГОСТ 33140

Для получения резино-битумного вяжущего (РБВ) использованы 3 вида дробленой резиновой крошки (РК) с различными соотношениями содержания целлюлозного волокна, полиэтилентерефталата и резины (РК-1, РК-2, РК-3) производства Камско-Волжского акционерного общества Резинотехники «КВАРТ».

Приготовление РБВ осуществлялось на лабораторном смесителе SILVERSON L5M (Великобритания). Для смешения РК с битумом применена стандартная перемешивающая насадка с головкой большого сдвигового усилия с квадратными отверстиями. Смешение РБВ осуществлялось в жестяных банках объемом 1 литр. Для нагрева и поддержания требуемой рабочей температуры во время приготовления и процесса дозревания использовалась масляная баня Memmert ONE 22 (Германия). В качестве теплоносителя применялось масло силиконовое ПМС-100 (ООО «Пента Юниор»). Жестяная банка с заранее взвешенным количеством битума погружалась в масляную баню, при этом жидкость не доходила до верха жестяной банки на 2-3 см.

Для приготовления РБВ использовался следующий метод. Производился нагрев битума до рабочей температуры – 160 °С. Насадка смесителя погружалась в битум, и создавалась скорость смешения 3000 об/мин. Вводилась РК со скоростью 5 г/мин. После окончания введения добавки смешение производилось в течение 5, 15 и 30 мин при температуре 180 °С и скорости вращения 4000 об/мин. Далее последующие 30 мин производился процесс дозревания РБВ при скорости вращения 1500 об/мин с постепенным охлаждением до 160 °С.

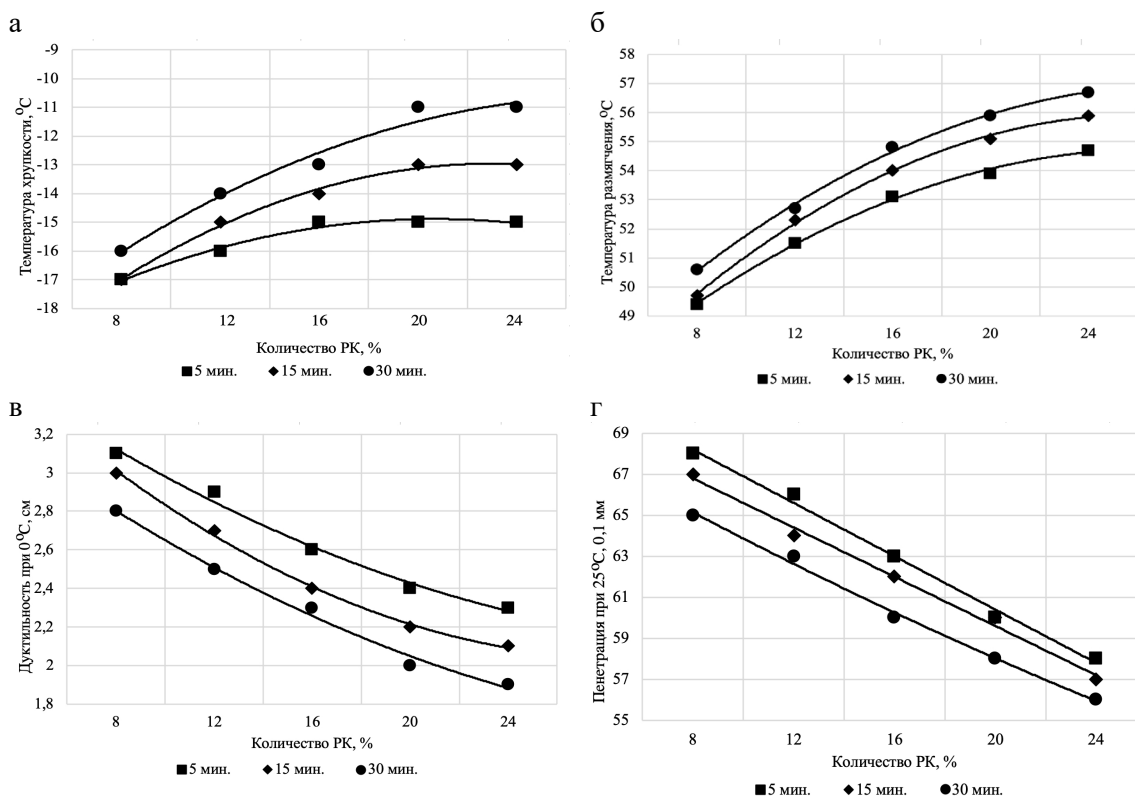


Рис. 1 – Зависимость влияния количества РК и времени приготовления на физико-механические свойства РБВ

а – температура хрупкости б – температура размягчения;

в – дуктильность при 0 °С; г – пенетрация при 25 °С (иллюстрации авторов)

Fig. 1 – Dependence of the influence of the amount of crumb rubber and preparation time on the physical and mechanical properties of the rubber-bitumen binder

a – brittleness temperature; b – softening temperature;

c – ductility at 0 °C; d – penetration at 25 °C (illustrations by the authors)

Испытания РБВ проводились в соответствии с ГОСТ 33133-2014. Испытания проводились по следующим показателям. Глубина проникания иглы при 25 °С по ГОСТ 33136-2014. В качестве прибора использован пенетрометр ЛинтеЛ ПН-20, производства АО «Башкирское специальное конструкторское бюро «Нефтехимавтоматика». Температура размягчения по кольцу и шару по ГОСТ 33142-2014. В качестве прибора использован аппарат автоматический для определения температуры размягчения нефтебитумов ЛинтеЛ КИШ-20, производства АО «Башкирское специальное конструкторское бюро «Нефтехимавтоматика». Растяжимость (дуктильность) при 0 °С по ГОСТ 33138-2014. Использован аппарат автоматический для определения растяжимости нефтяных битумов ЛинтеЛ ДБ-20-100, производства АО «Башкирское специальное конструкторское бюро «Нефтехимавтоматика». Температура хрупкости по Фраасу в соответствии ГОСТ 33143-2014. Применен аппарат автоматический для определения температуры нефтяных битумов ЛинтеЛ АТХ-20, производства АО «Башкирское специальное конструкторское бюро «Нефтехимавтоматика».

С целью определения количества целлюлозы и резины в РЦК проводилась регистрация ИК-спектров образцов на Фурье ИК-спектрофотометре фирмы Perkin-Elmer,

модель Spectrum 65, с помощью приставки НПВО Miracle ATR (кристалл ZnSe) в области 4000-600 см<sup>-1</sup>, как правило, при 20 сканах. Для регистрации ИК-спектров образцы прижимались к кристаллу НПВО специальным прижимом, входящим в комплект приставки. После регистрации автоматически осуществлялась НПВО-коррекция и сохранение спектра. Обработка спектров производилась с помощью прилагаемого программного обеспечения (Perkin-Elmer Softwear V.10.1.1).

### 3 Результаты и обсуждение

В табл. 2 представлены результаты испытаний РБВ на физико-механические свойства. На основе табл. 2 построены графики зависимости влияния времени приготовления и количества РК-1 на физико-механические характеристики РБВ.

Таблица 2

Зависимость влияния количества РК и времени приготовления на физико-механические свойства РБВ

№ п/п	Время приготовления	Добавка	Показатели	Дозировка резиновой крошки, %				
				8	12	16	20	24
1	5	РК-1	П <sub>25</sub> , мм	68	66	63	60	58
2			КиШ, °С	49,4	52,5	53,1	53,9	54,7
3			Д <sub>0</sub> , см	3,1	2,9	2,6	2,4	2,3
4			Т <sub>х</sub> , °С	-17	-16	-15	-15	-15
5	15		П <sub>25</sub> , мм	67	64	62	60	57
6			КиШ, °С	49,7	53,2	54,0	55,1	55,9
7			Д <sub>0</sub> , см	3,0	2,7	2,4	2,2	2,1
8			Т <sub>х</sub> , °С	-17	-15	-14	-13	-13
9	30		П <sub>25</sub> , мм	65	63	60	58	56
10			КиШ, °С	50,6	53,7	54,8	55,9	56,7
11			Д <sub>0</sub> , см	2,8	2,5	2,3	2,0	1,9
12			Т <sub>х</sub> , °С	-16	-14	-13	-11	-11
13	5	РК-2	П <sub>25</sub> , мм	67	65	61	59	57
14			КиШ, °С	50,6	55,9	58,1	61,4	62,3
15			Д <sub>0</sub> , см	3,0	2,7	2,5	2,2	2,1
16			Т <sub>х</sub> , °С	-17	-15	-13	-13	-12
17	15		П <sub>25</sub> , мм	65	63	59	58	55
18			КиШ, °С	52,0	57,8	59,9	62,5	63,2
19			Д <sub>0</sub> , см	2,8	2,6	2,2	2,1	2,0
20			Т <sub>х</sub> , °С	-16	-14	-13	-13	-11
21	30		П <sub>25</sub> , мм	64	61	57	56	53
22			КиШ, °С	53,5	58,9	61,1	63,1	63,7
23			Д <sub>0</sub> , см	2,8	2,4	2,1	1,8	1,6
24			Т <sub>х</sub> , °С	-15	-14	-12	-11	-11
25	5	РК-3	П <sub>25</sub> , мм	65	63	60	58	57
26			КиШ, °С	51,1	53,7	54,9	56,3	58,1
27			Д <sub>0</sub> , см	2,9	2,6	2,5	2,1	2,0
28			Т <sub>х</sub> , °С	-16	-14	-12	-11	-10
29	15		П <sub>25</sub> , мм	63	62	60	57	55
30			КиШ, °С	52,4	55,9	56,7	58,8	60,9
31			Д <sub>0</sub> , см	2,6	2,3	2,2	2,0	1,8
32			Т <sub>х</sub> , °С	-15	-15	-12	-10	-9
33	30		П <sub>25</sub> , мм	62	60	59	57	54
34			КиШ, °С	53,2	56,0	57,2	61,7	62,9
35			Д <sub>0</sub> , см	2,5	2,3	2,0	1,5	1,4
36			Т <sub>х</sub> , °С	-14	13	-10	-10	-9

Как видно из табл. 2 и рис. 1, с введением добавок РК-1, РК-2 и РК-3 в битум в количестве от 8 до 24 % и времени приготовления от 5 до 15 минут: пенетрация при 25 °С уменьшилась на 14,92 %, 17,19 %, 12,90 %; температура размягчения повысилась на 12,47

%, 23,12 %, 18,23; дуктильность при 0 °С снизилась на 32,43 %, 23,68 %, 37,50 %; температура хрупкости повысилась на 31,25 %, 34,54 %, 35,71 % соответственно.

Установлено, что с введением содержания добавок РК-1, РК-2 и РК-3 в РБВ повышаются высокотемпературные свойства и снижаются низкотемпературные характеристики, это связано с уменьшением содержания частиц легкой фракции в битуме из-за поглощения резиновой крошкой, а также присутствием в смеси не растворившихся частиц добавки [8, 9].

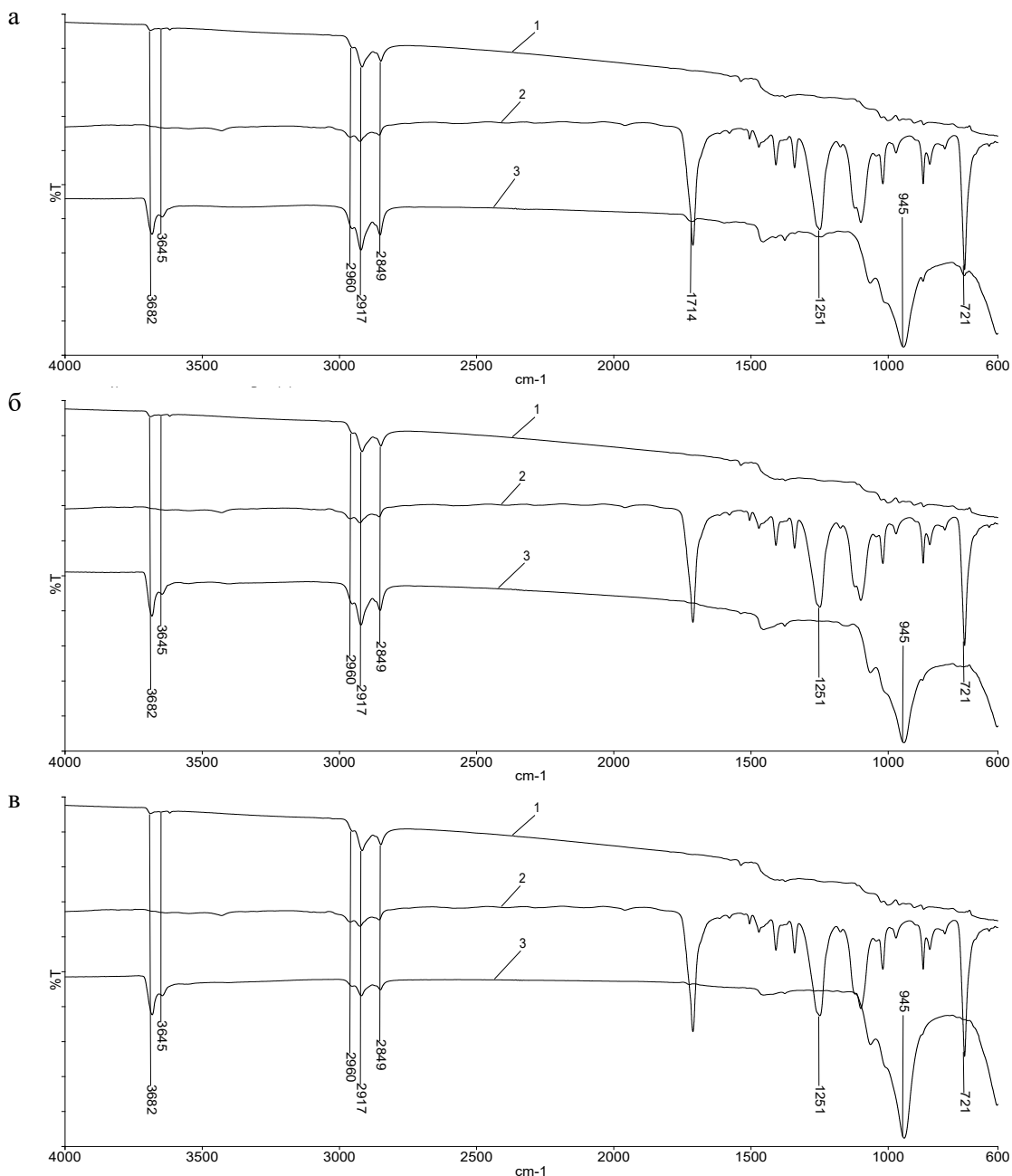


Рис. 2 – ИК-спектры:

1 – резиновая крошка; 2 – полимера, входящего в состав резиновой крошки; 3 – РБВ;  
а – РК-1; б – РК-2; в – РК-3 (иллюстрация авторов)

Fig. 2 - IR spectra:

1 – crumb rubber; 2 – polymer included in the composition of crumb rubber;  
3 – rubber-bitumen binder;

a – RK-1; b – RK-2; c – RK-3 (illustration by the authors)

Как видно из рис. 2, наиболее интенсивной в спектре РБВ на основе РК-1 является пик  $945\text{ см}^{-1}$ . Эта полоса отвечает валентным колебаниям связей С-О-С в так называемых пиранозных циклах, являющихся основной структурной единицей высокомолекулярных

углеводов, в частности, целлюлозы. Преобладающая интенсивность этой полосы свидетельствует о том, что именно из целлюлозы (не менее, чем на 80 % по массе) состоит исследуемый образец. Кроме целлюлозы в состав РБВ на основе РК-1 входят в незначительных количествах также полимер полиэтилентерефталат, о чем свидетельствуют слабые по интенсивности полосы  $1714\text{ см}^{-1}$  (валентные колебания карбонильных С=О групп), а также  $1251$  и  $721\text{ см}^{-1}$  (деформационные колебания этих же групп), и резиновая крошка (совпадают полосы  $2960$ ,  $2917$  и  $2849\text{ см}^{-1}$  – валентные колебания  $\text{CH}_2$  и  $\text{CH}_3$ -групп, а также  $3682$  и  $3645\text{ см}^{-1}$  – валентные колебания свободных от водородной связи ОН-групп).

В РБВ на основе РК-2 самым интенсивным также является пик  $945\text{ см}^{-1}$  (рис.2 б) пиранозных циклов, т.е. этот образец также состоит в основном из целлюлозы. Присутствует также резиновая крошка в количестве, несколько большем, чем в РБВ на основе РК-1, т.к. пики  $3682$  и  $3645\text{ см}^{-1}$  в спектре этого образца более интенсивны. В то же время, в этом образце отсутствуют пики полиэтилентерефталата  $1714$ ,  $1251$  и  $721\text{ см}^{-1}$ , т.е. данный полимер в состав РК-2 не входит. Практически то же самое можно сказать и РБВ на основе РК-3 (рис. 2 в) с той лишь разницей, что содержание резиновой крошки в нем примерно вдвое меньше, чем в РБВ на основе РК-1 и РБВ на основе РК-2, т.к. пики  $3682$  и  $3645\text{ см}^{-1}$  примерно вдвое слабее по интенсивности.

Установлено, что основным компонентом (не менее 80-90 % по массе) во всех трех образцах является целлюлоза, о чем свидетельствует интенсивный характеристический пик  $945\text{ см}^{-1}$  пиранозных циклов, являющийся основной структурной единицей всех высокоуглеводов и, в частности, целлюлозы.

#### 4. Заключение

Установлено, что с введением содержания добавок РК-1, РК-2 и РК-3 в РБВ повышаются высокотемпературные свойства и снижаются низкотемпературные характеристики, это связано с уменьшением содержания частиц легкой фракции в битуме из-за поглощения резиновой крошкой, а также присутствием в смеси не растворившихся частиц добавки. Модификация битума резиновой крошкой приводит к повышению устойчивости к колееобразованию асфальтобетона, однако снижает его устойчивость к низкотемпературному растрескиванию. Для повышения низкотемпературных свойств требуется оптимизация резино-битумного вяжущего с дополнительным введением добавок пластификаторов.

Показано, что с введением добавок РК-1, РК-2 и РК-3 в битум в количестве от 8 до 24 % и времени приготовления от 5 до 15 минут: пенетрация при  $25\text{ °C}$  уменьшилась на 14,92 %, 17,19 %, 12,90 %; температура размягчения повысилась на 12,47 %, 23,12 %, 18,23; дуктильность при  $0\text{ °C}$  снизилась на 32,43 %, 23,68 %, 37,50 %; температура хрупкости повысилась на 31,25 %, 34,54 %, 35,71 % соответственно.

Установлено, что основным компонентом (не менее 80-90 % по массе) во всех трех образцах резиновой крошки является целлюлоза, о чем свидетельствует интенсивный характеристический пик  $945\text{ см}^{-1}$  пиранозных циклов, являющийся основной структурной единицей всех высокоуглеводов и, в частности, целлюлозы.

#### Список литературы/References

1. Гарипов А.Р., Макаров Д.Б., Хозин В.Г., Степанов С.В. Тонкодисперсная битумная эмульсия для модификации цементного бетона дорожного назначения // *Construction and Geotechnics*. 2022. Т. 13. No 3. С. 85-97. doi: 10.15593/2224-9826/2022.3.08. [Garipov A.R., Makarov D.B., Khozin V.G., Stepanov S.V. Fine bitumen emulsion for modifying cement concrete for road use // *Construction and Geotechnics*. 2022. Vol. 13. No. 3. P. 85-97.]
2. Padhan R.K., Sreeram A. Enhancement of storage stability and rheological properties of polyethylene (PE) modified asphalt using cross linking and reactive polymer based additives. *Construction and Building Materials*. 2021. No. 188. P. 772-780. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.155.

3. Zhang W., Jia Z., Zhang Y., Hu K., Ding L., Wang F. The effect of direct-to-plant styrene-butadiene-styrene block copolymer components on bitumen modification. *Polymers*. 2019. No. 11. P. 140. doi: 10.3390/polym11010140.
4. Wang J., Yuan J., Xiao F., Li Z., Wang J., Xu Z. Performance investigation and sustainability evaluation of multiple polymer asphalt mixtures in airfield pavement. *Journal of Cleaner Production*. 2018. No. 189. P. 67-77. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.03.208.
5. Li J., Han M., Muhammad Y., Liu Y., Su Z., Yang J., Yang S., Duan S. Preparation and properties of SBS-G-GOS-modified asphalt based on a thiol-ene click reaction in a bituminous environment. *Polymers*. 2018. No. 10(11). P. 1264. doi: 10.3390/polym10111264.
6. Bilema M.A., Aman M.Y., Hassan N.A., Ahmad K.A., Elghatas H.M., Radwan A.A., Shyaa A.S. Moisture Sensitivity of Crumb Rubber Modified Modifier Warm Mix Asphalt Additive for Two Different Compaction Temperatures. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2018. No. 140. P. 012072. doi: 10.1088/1755-1315/140/1/012072.
7. Иванов С.А., Шабаев С.Н., Тюрюханов К.Ю. Утилизация резиновой крошки путем производства модифицированного битума. *Инженерный вестник Дона*. 2022. No 9(93). С. 143-160. [Ivanov S.A., Shabaev S.N., Tyuryukhanov K.Yu. Utilization of crumb rubber by producing modified bitumen. *Engineering Bulletin of the Don*. 2022. No. 9(93). P. 143-160.]
8. Jiangmiao Y., Zhibin R., Zheming G., Qi W., Zihan Zh., Huayang Y. Recycled Heavy Bio Oil as Performance Enhancer for Rubberized Bituminous Binders. *Polymers*. 2019. No. 11. P. 800. doi:10.3390/polym11050800.
9. Wang H., Liu X., Apostolidis P., Erkens S., Scarpas T. Numerical investigation of rubber swelling in bitumen. *Construction and Building Materials*. 2019. No. 214. P. 506-515. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.04.144.
10. Mohajerani A., Burnett L., Smith J.V., Markovski S., Rodwell G., Rahman M.T., Kurmus H., Mirzababaei M., Arulrajah A., Horpibulsuk S. Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review. *Resources Conservation and Recycling*. 2020. No. 155. P. 104679. doi:10.1016/j.resconrec.2020.104679.
11. Кистойчева К.И. Использование битумно-резиновых материалов в строительстве. Тенденции развития науки и образования. 2023. No 96-10. С. 44-47. doi: 10.18411/trnio-04-2023-518. [Kistoicheva K.I. Use of bitumen-rubber materials in construction. *Trends in the development of science and education*. 2023. No. 96-10. P. 44-47. doi: 10.18411/trnio-04-2023-518.]
12. Liu H., Chen Z., Wang W., Wang H., Hao P. Investigation of the rheological modification mechanism of crumb rubber modified asphalt (CRMA) containing TOR additive. *Construction and Building Materials*. 2014. No. 67. P. 225-233. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.031.
13. Babagoli R., Jalali F., Khabooshani M. Performance properties of WMA modified binders and asphalt mixtures containing PPA/SBR polymer blends. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2023. No. 36(1). P. 274-306. doi: 10.1177/08927057211006460.
14. Bocci E., Prosperi E., Bocci M. Rheological Modeling of Bituminous Mixtures Including Polymer-Modified Binder and Fine Crumb Rubber Added through Dry Process. *Materials*. 2023. No. 16. P. 310. doi: 10.3390/ma16010310.
15. Nonde L., Zejiao D., Liping C. Evaluating the High-Temperature Properties and Reaction Mechanism of Terminal Blend Rubber/Nano Silica Composite Modified Asphalt Using Activated Rubber. *Nanomaterials*. 2022. No. 12. P. 4388. doi: 10.3390/nano12244388.
16. Vdovin E.A., Stroganov V.F. Optimization of complex frost-resisting additives in line with operational requirements towards freezing temperature in road dressing constructions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. No. 832. P. 012034. doi: 10.1088/1757-899X/832/1/012034.



17. Vdovin E., Stroganov V., Konovalov N. Modification of Road Soil Cement with Activated Fillers. Proceedings of EECCE 2020. 2021. P. 335-345. doi: 10.1007/978-3-030-72404-7\_33.
18. Николаева Л.А., Вдовин Е.А., Голубчиков М.А., Мавлиев Л.Ф. Способы утилизации отработанного сорбента нефтепродуктов на основе шлама химводоочистки Казанской ТЭЦ-1. Экология и промышленность России. 2014. № 7. С. 18-20. [Nikolaeva L.A., Vdovin E.A., Golubchikov M.A., Mavliev L.F. Methods for recycling waste oil product sorbent based on chemical water treatment sludge at Kazan Thermal Power Plant -1. Ecology and industry of Russia. 2014. No. 7. P. 18-20.]
19. Bulanov P.E., Vdovin E.A. Mavliev L.F. Modification of bituminous binders with styrene-butadiene-styrene copolymer and sulfur. Construction of Unique Buildings and Structures. 2022. No. 105. P. 10504. doi: 10.4123/CUBS.105.4.

#### Информация об авторах

**Смирнов Денис Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: denis271119747@yandex.ru

**Буланов Павел Ефимович**, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: pavel.bulanov1991@yandex.ru

**Утяшева Лилия Рифовна**, инженер, ГКУ «Главтатдортранс», г. Казань, Российская Федерация

E-mail: liliyautyasheva81@gmail.com

#### Information about the authors

**Denis S. Smirnov**, candidate of technical sciences, assistant professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: denis271119747@yandex.ru

**Pavel E. Bulanov**, candidate of technical sciences, assistant professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: pavel.bulanov1991@yandex.ru

**Liliya R. Utyasheva**, engineer, SPI «Glavtattortrans», Kazan, Russian Federation

E-mail: liliyautyasheva81@gmail.com