



Research Article

Received: December 13, 2022

Accepted: December 23, 2022

Published: December 28, 2022

ISSN 2304-6295

## Modification of bituminous binders with styrene-butadiene-styrene copolymer and sulfur

Bulanov, Pavel Efimovich<sup>1\*</sup> Vdovin, Evgeny Anatolievich<sup>1</sup> Mavliev, Lenar Fidaesovich<sup>1</sup>

1 Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation; vdovin007@mail.ru (V.E.A.); pavel.bulanov1991@yandex.ru (B.P.E.); lenarmavliev@yandex.ru (M.L.F.)

Correspondence:\* email pavel.bulanov1991@yandex.ru; contact phone +79520444348

### Keywords:

Polymer-modified bitumen; Modification; Styrene-butadiene-styrene copolymer; Sulfur; Aging

### Abstract:

**The object of research** is bituminous binders modified with styrene-butadiene-styrene and sulfur. **The purpose of this work** is to study the physical and technical properties of polymer-bitumen binders modified with sulfur. The influence of styrene-butadiene-styrene and sulfur on the physical and technical properties and short-term aging of the polymer-bitumen binder is considered. **Method.** Tests of bitumen and polymer-bitumen binders were carried out according to the following indicators softening point, dynamic viscosity at 105 °C, 135 °C and 165 °C, penetration at 25 °C, extensibility at 0 °C, Fraas brittleness temperature, as well as the difference in softening temperature after aging in the RTFOT oven. **Results.** The dependences of the influence of sulfur on high-temperature and low-temperature properties, as well as on the short-term aging of bitumen and polymer-bitumen binder based on styrene-butadiene-styrene copolymer have been established. It was found that with an increase in the sulfur content in bitumen, the difference in softening temperature after aging in the RTFOT furnace increases. However, the modification of the polymer-bitumen binder with sulfur gives the opposite effect, up to negative values due to the destruction of polysulfide bonds as a result of thermal exposure and dynamic shear.

## Introduction / Введение

При строительстве асфальтобетонных покрытий особое внимание уделяют выбору битумного вяжущего. Именно от вяжущего, в первую очередь, зависит прочность покрытия и его стойкость к образованию разного рода дефектов: колеи пластичности, усталостного и низкотемпературного растрескиваний [1]. Однако, нагрузка на автомобильные дороги очень сильно возросла из-за резкого увеличения количества тяжеловесных фур и образования, так называемых, «пробок». Поэтому возникла необходимость повысить качество битумных вяжущих [2].

Повышение качества битумных вяжущих заключается в их модификации [3]. По данным [4] существует 2 способа модификации битумных вяжущих: технологические [5] и рецептурные [6].

Технологические подразделяются: на условия приготовления (давление, температура, вспенивание, компаундирование и т.д.) и физические воздействия (ультразвуковая обработка, электромагнитное излучение, ИК-воздействие, СВЧ-активация, механоактивация, рентгеновское облучение, кавитационная обработка и т.д.) [5]-[8].

Применение технологических методов требует сложного аппаратного оснащения, высокой трудоемкости, затрат энергии и больших капиталовложений. В связи с чем, более доступным,

K Vdovin, E.A.; Bulanov, P.E.; Mavliev, L.F.;

Modification of bituminous binders with styrene-butadiene-styrene copolymer and sulfur;

2022; Construction of Unique Buildings and Structures; 105 Article No 10504. doi: 10.4123/CUBS.105.4



эффективным и простым способом модификации битумов, является рецептурный, который основан на введении в состав дополнительных битумных вяжущих компонентов, изменяющих исходные структуру и свойства, на различных стадиях их получения и переработки [9].

Исследования, направленные на улучшение реологических свойств битумов (стойкость к снижению старения и повышению температуры эксплуатации) за счет использования модификаторов, были начаты в 1843 году [10], [11]. В последние годы для модификации битумов часто используются полимерные материалы в качестве модификаторов [12], [13]. Применение синтетических полимеров для улучшения характеристик битумов началось с 1970-х годов [14]. Во всем мире среди применяемых добавок приблизительно 75 % составляют эластомеры, 15 % термопласты [16].

Применение модифицированных битумов полимерами в асфальтобетонных покрытиях дорожных одежд позволяет повысить стойкость к образованию колеи пластичности, усталостным и низкотемпературным трещинам, износостойкости, а также старению [17-19]. Однако, модифицированные полимером битумы (ПБВ), сильно зависят как от типа добавляемого полимера, так и от его процентного содержания [20], [21].

Среди применяемых полимеров в ряде стран для получения ПБВ предпочтения отдают стирол-бутадиен-стирольным каучукам (SBS), которые относятся к группе эластомеров [22]. Основное преимущество ПБВ на основе эластомеров в сравнении с традиционными дорожными битумами – создание равномерной эластичной полимерной сетки в битумном вяжущем, способной к обратимой пластификации при изменении температур [23].

Для повышения высокотемпературных свойств битумов и ПБВ на основе SBS рекомендуется введение серы [24]. При добавлении серы в ПБВ на основе SBS, в результате динамической вулканизации, в битумной матрице образуется химически сшиваемая полимерная сетка. Однако, низкотемпературные свойства непрерывно снижаются при дальнейшем повышении количества серы в ПБВ из-за увеличенного количества полисульфидных связей, что ведет к ограничению движения полимерных молекул [25].

В этой связи, **целью** работы является исследование физико-технических свойств полимерно-битумных вяжущих, модифицированных серой.

Для достижения поставленной цели решались **задачи**:

- исследование физико-технических характеристик битума, модифицированного SBS;
- определение влияния серы на физико-технические свойства полимерно-битумного вяжущего.
- исследование краткосрочного старения полимерно-битумных вяжущих, модифицированных серой.

## 2 Materials and Methods / Материалы и методы

Для проведения исследований в качестве вяжущего применен битум, соответствующий марке БНД 70/100 по Российскому государственному стандарту ГОСТ 33133-2014 [26] производства АО «ТАИФ-НК» (г. Нижнекамск, Россия). Результаты испытаний битума в соответствии с Российским государственным стандартом ГОСТ 33133-2014 [26] представлены в таблице 1.

Для получения ПБВ использован полимер SBS (Kraton D-1192 F). Производитель Kraton Polymers, США. Данный полимер обладает следующими показателями: содержание стирола – 30 %, молекулярная структура – линейная, удельная плотность – 0.94 т/м<sup>3</sup>, показатель текучести расплава 200 °С/5 кг – < 1 г/10 мин, насыпная плотность – 0.4 т/м<sup>3</sup>, твердость по Шору А, 30 сек – 70, модуль упругости 300 % – 2.9 МПа, удлинение на разрыв – 880 %.

Приготовление полимерно-битумных вяжущих осуществлялось на лабораторном смесителе SILVERSON L5M (Великобритания). Для растворения SBS в ПБВ применена двойная перемешивающая насадка ДУПЛЕКС (Великобритания). Смешение ПБВ 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 производства ООО «Пента Юниор» (г. Москва, Россия). Жестяная банка с заранее взвешенным количеством битума погружалась в масляную баню, при этом жидкость не доходила до верха жестяной банки на 2-3 см.

**Таблица 1. Физико-технические свойства битума марки БНД 70/100**  
**Table 1. Physical and technical properties of BND 70/100 bitumen**

№ 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

Модификация битума и ПБВ производилась серой производства АО «ТАИФ-НК», основные свойства представлены в таблице 2.

**Таблица 2. Физико-технические свойства серы**  
**Table 2. Physical and technical properties of sulfur**

№ п/п	Наименование показателя	Фактический показатель	Требования ТУ 38.1011217-89
1	Внешний вид	98.8	92
2	Массовая доля гранул диаметром 2.-5.0 мм, % не менее	Гранулы желтого цвета	Гранулы желтого цвета
3	Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	99.99	99.98
4	Массовая доля серы, %, не менее	1.3	1.1-1.3
5	Массовая доля золы, %, не более	0.007	0.02
6	Массовая доля органических веществ, %, не более	0.01	Не выше 36
7	Массовая доля кислот в пересчете на серную кислоту, %, не более	Отсутствие	Отсутствие
8	Массовая доля воды, %, не более	Следы	Следы
9	Механические загрязнения (бумага, дерево, песок и т.д.)	0.01	Не более 0.01

При приготовлении ПБВ из SBS использовался следующий метод. Предварительно взвешенное количество битума и пластификатора (при необходимости) в жестяной банке погружалось в масляную баню. Производился нагрев битума до рабочей температуры приготовления ПБВ – 180 °С. Насадка смесителя погружалась в битум, и создавалась скорость смешения 4500 об/мин. Вводились необходимые добавки со скоростью 5 г/мин. После окончания введения добавок смешение производилось в течении 0.5 ч при температуре 180 °С и скорости вращения 4500 об/мин. Далее последующие 2 ч производился процесс дозревания ПБВ при скорости вращения 1500 об/мин и равномерного охлаждения со 180 °С до 160 °С.

Испытания битумов и полимерно-битумных вяжущих проводились в соответствии с ГОСТ 33133-2014 [26] и ГОСТ Р 52056-2003 [27]. Испытания проводились по следующим показателям.

Глубина проникания иглы при 25 °С по Российскому государственному стандарту ГОСТ 33136-2014 [28]. В качестве прибора использован пенетрометр Линтел ПН-20, производства АО «Башкирское специальное конструкторское бюро «Нефтехимавтоматика» (г. Уфа, Россия).

Температура размягчения по кольцу и шару по Российскому государственному стандарту ГОСТ 33142-2014 [29]. В качестве прибора использован аппарат автоматический для определения температуры размягчения нефтебитумов Линтел КИШ-20, производства АО «Башкирское специальное конструкторское бюро «Нефтехимавтоматика» (г. Уфа, Россия).



Растяжимость (дуктильность) при 0 °С по Российскому государственному стандарту ГОСТ 33138-2014 [30]. В качестве прибора использован аппарат автоматический для определения растяжимости нефтяных битумов Линтел ДБ-20-100, производства АО «Башкирское специальное конструкторское бюро «Нефтехимавтоматика» (г. Уфа, Россия).

Температура хрупкости по Фраасу в соответствии Российскому государственному стандарту ГОСТ 33143-2014 [31]. В качестве прибора использован аппарат автоматический для определения температуры нефтяных битумов Линтел АТХ-20, производства АО «Башкирское специальное конструкторское бюро «Нефтехимавтоматика» (г. Уфа, Россия).

Изменение массы образца и изменение температуры размягчения после старения в печи RTFOT по Российскому государственному стандарту ГОСТ 33140-2014 [32]. В качестве прибора для старения битумов и ПБВ использовано оборудование Rolling thin-film B066N1 (Matest, Италия).

Динамическая вязкость при 105 °С, 135 °С и 165 °С по Российскому государственному стандарту ГОСТ 33137-2014 [33]. Метод испытаний заключается в измерении относительного сопротивления течению, вызванному сдвиговым воздействием на битум вращающимися элементами конфигурации. Динамическую вязкость вычисляют как отношение между приложенным напряжением сдвига и скоростью сдвига. Использован вискозиметр Брукфилда DV2T (Brookfield, США).

### 3 Results and Discussion / Результаты и обсуждение

Установлено, что при модификации битума серой с содержанием 0.05-0.15 %: температура размягчения и динамическая вязкость при 105 °С, 135 °С и 165 °С увеличилась на 2.7-7.5 %, 9.6-30.9 %, 13.5-37.8 %, 54.5-172.7 % соответственно; пенетрация при 25 °С уменьшилась на 1.4-2.7 %; растяжимость при 0 °С снизилась на 13.2-42.1 %; температура хрупкости по Фраасу увеличилась 10.5-36.8 %.

По данным результатов видно, что при модификации битума серой, улучшаются высокотемпературные свойства, тогда как низкотемпературные характеристики ухудшаются, что согласуется со следующими исследованиями [34].

При модификации серой (в количестве 0.05-0.15 %) ПБВ на основе SBS (в количестве 2-6 %), установлено, что повышение температуры размягчения и динамической вязкости при 105 °С, 135 °С и 165 °С составило 3.1-24.8 %, 15.1-89.2 %, 13.8-23.5 %, 59.3-64.8 % соответственно. Пенетрация при 25 °С уменьшилась на 1.4-3.7 %; растяжимость при 0 °С увеличилась на 15.3-63.4 %; температура хрупкости по Фраасу уменьшилась на 3.6-29.4 %.

На основе низкотемпературных свойств (растяжимость при 0 °С, температура хрупкости по Фраасу) ПБВ, модифицированного серой, определено оптимальное содержание серы: при 4 % SBS в ПБВ – 0.1 % серы; при 6 % SBS в ПБВ – 0.1 % серы 0.05-0.10 % серы.

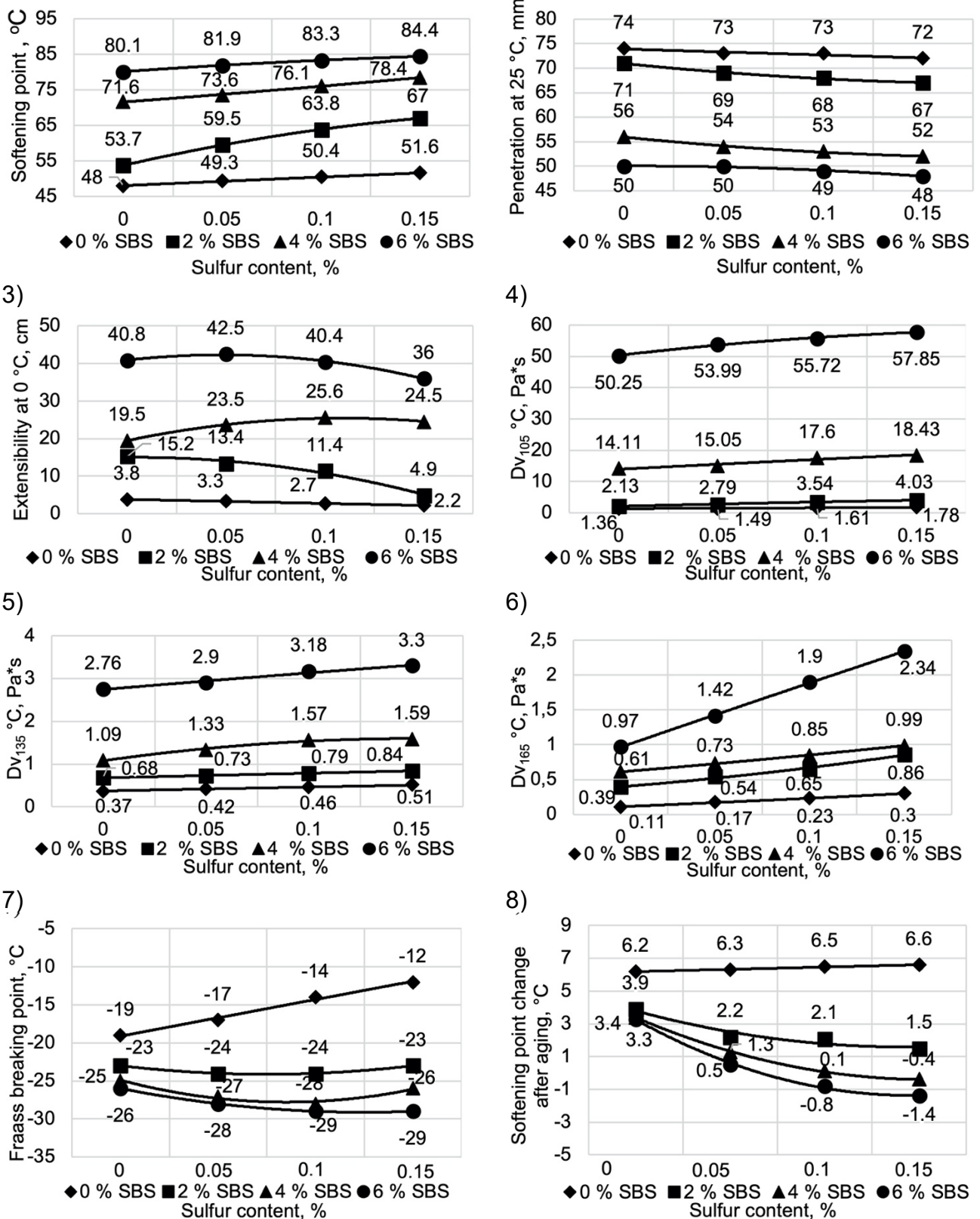
С увеличением содержания серы в битуме повышается разность температуры размягчения после старения в печи RTFOT. Однако, модификация серой ПБВ обуславливает обратный эффект (изменение температуры размягчения после старения в печи RTFOT битума, модифицированного SBS в количестве 6 % и серой в количестве 0.15 % – -1.6 °С).

Влияние окислительного старения на высокотемпературные свойства ПБВ разделяют на два основных механизма. В первом, увеличение количества твердых компонентов битума, таких как асфальтены и смолы, в результате старения увеличивает высокотемпературные свойства вяжущих и снижает низкотемпературные характеристики. Во-вторых, разрушение сетки полимера, диспергированного в битуме после старения, может привести к противоположному эффекту [35].

Образованные полисульфидные связи  $-(S)_x-$  ( $x=4-6$ ) между молекулами SBS в ПБВ, модифицированной серой, являются относительно слабыми. В двойных углерод-углеродных связях C=C структура бутадиена имеет реакционноспособную  $\pi$ -связь. При динамической вулканизации SBS реакционноспособная  $\pi$ -связь разрывается и превращается в углерод-серную связь C-S, поэтому образуется сшитая полимерная сетка в битумной матрице, что приводит к повышению высокотемпературных свойств [36, 37].

1)

2)



**Рис. 1 – Зависимости влияния серы и SBS на физико-технические характеристики модифицированных битумов: 1 – температура размягчения по кольцу и шару; 2 – глубина проникания иглы при 25 °C; 3 – растяжимость (дуктильность) при 0 °C; 4 – динамическая вязкость при 105 °C; 5 – динамическая вязкость при 135 °C; 6 – динамическая вязкость при 165 °C; 7 – температура хрупкости по Фраасу; 8 – изменение массы образца и изменение температуры размягчения после старения в печи RTFOT**

**Fig. 1 - Dependences of the influence of sulfur and SBS on the physical and technical characteristics of modified bitumen: 1 - Softening point; 2 – Penetration at 25 °C; 3 - Extensibility at 0 °C;**



#### 4 – Dynamic viscosity at 105 °C (Dv<sub>105</sub>); 5 – Dynamic viscosity at 105 °C (Dv<sub>135</sub>); 6 – Dynamic viscosity at 105 °C (Dv<sub>165</sub>); 7 - Fraass breaking point; 8 - Softening point change after aging

Однако длина полисульфидной связи больше, а ее энергия связи ниже. Под воздействием теплового и динамического сдвига эти слабые полисульфидные связи разрываются, и сшитая полимерная сеть разрушается, что вероятно ведет к снижению высокотемпературных свойств после старения ПБВ на основе SBS, модифицированной серой [37, 38].

## 4 Conclusions / Заключение

1) Установлено, что при модификации битума серой с содержанием 0.05-0.15 %: температура размягчения и динамическая вязкость при 105 °C, 135 °C и 165 °C увеличилась на 4.1-8.9 %, 9.6-30.9 %, 13.5-37.8 %, 54.5-172.7 % соответственно; пенетрация при 25 °C уменьшилась на 1.4-2.7 %; растяжимость при 0 °C снизилась на 13.2-42.1 %; температура хрупкости по Фраасу увеличилась 10.5-36.8 %.

2) При модификации серой (в количестве 0.05-0.15 %) полимерно-битумного вяжущего на основе SBS (в количестве 2-6 %), установлено, что повышение температуры размягчения и динамической вязкости при 105 °C, 135 °C и 165 °C составило 3.1-24.8 %, 15.1-89.2 %, 13.8-23.5 %, 59.3-64.8 % соответственно. Пенетрация при 25 °C уменьшилась на 1.4-3.7 %; растяжимость при 0 °C увеличилась на 15.3-63.4 %; температура хрупкости по Фраасу уменьшилась на 3.6-29.4 %.

3) На основе низкотемпературных свойств (растяжимость при 0 °C и температура хрупкости по Фраасу) полимерно-битумного вяжущего, модифицированного серой, определено оптимальное содержание модификатора: при содержании 4 % SBS в полимерно-битумном вяжущем следует вводить 0.1 % серы; при 6 % SBS в полимерно-битумном вяжущем – 0.05-0.10 % серы.

4) Выявлено, что с увеличением содержания серы в битуме повышается разность температуры размягчения после старения в печи RTFOT. Однако, модификация серой полимерно-битумного вяжущего дает обратный эффект, вплоть до отрицательных значений из-за разрушения полисульфидных связей в результате теплового воздействия и динамического сдвига.

## References

- 1) Celauro, C., Teresi, R., Dintcheva, N. (2022) Effect of Short-Term and UV Irradiation Aging on the Behaviour of SBS-Modified Bitumen. *Sustainability*, 14(11), 6915, <https://doi.org/10.3390/su14116915>.
- 2) Wei, H., Bai, X., Qian, G., Wang, F., Li, Zh., Jin, J., Zhang, Y. (2019) Aging Mechanism and Properties of SBS Modified Bitumen under Complex Environmental Conditions. *Materials*, 12(7), 1189, <https://doi.org/10.3390/ma12071189>.
- 3) Rasool, R.T., Hongru, Y., Hassan, A.A., Wang, S., Zhang, H. (2018) In-Field Aging Process of High Content SBS Modified Asphalt in Porous Pavement. *Polymer Degradation and Stability*, 155, 230-237, <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.07.023>.
- 4) Diab A., Pais, J., Chen, S., Gupta, A., Li, X., You, L., Hasan, M. (2022) High, Intermediate and Low Temperature Performance Appraisal of Elastomeric and Plastomeric Asphalt Binders and Mixes. *Journal of Elastomers & Plastics*, 54(2), 225-246, <https://doi.org/10.1177/00952443211038663>.
- 5) Volkova, G., Morozova, A. (2022) Structural Transformations of Bitumen Asphaltenes after Ultrasonic Treatment. *Solid Fuel Chemistry*, 56(2), 133-137, <https://doi.org/10.3103/S0361521922020112>.
- 6) Ben, Zh., Chen, H., Zhang, H., Kuang, D., Wu, J., Zhang, X. A. (2019) Study on Physical and Rheological Properties of Rubberized Bitumen Modified by Different Methods. *Materials*, 12(21), 3538, <https://doi.org/10.3390/ma12213538>.
- 7) Fathy, E.S., Khaled, El-Nemr, F., Youssef, H.A., El-Shafie, M. (2021) Effect of Gamma Irradiation and Oxidized Bitumen on the Performance of the Modified Crumb Rubber for Various Applications. *Radiochimica Acta*, 109(1), 47-54, <https://doi.org/10.1515/ract-2020-0080>.
- 8) Mohapatra, D., Kirpalani, D. (2016) Bitumen Heavy Oil Upgrading by Cavitation Processing: Effect on Asphaltene Separation, Rheology, and Metal Content. *Applied Petrochemical Research*, 6(2), 107-115, <https://doi.org/10.1007/s13203-016-0146-1>.



9) Ratajczak, M., Babiak, M., Bilski, M., Zieliński, K., Kosno, J. (2018) Innovative Methods of Bitumen Modification Used in Waterproofing. *International Journal of Engineering and Technology*, 10(4), 308-314, <https://doi.org/10.7763/IJET.2018.V10.1075>.

10) Yalçın, E., Çeloğlu, M.E., Akpolat, M., Erdoğan, Y.Ö., Alataş, T., Kök, B.V., Yılmaz, M. (2019) Effect of Gilsonite Use on Storage Stability of Styrene-butadiene-styrene Modified Bitumen. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 63(3), 833-844, <https://doi.org/10.3311/PPci.12816>

11) Xiong, J.P., Xuan, W., Feng, M., Ma, F. (2019) The Performance of SBS Modified Asphalt Binder Base on the MSCR Test. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 631, 022018, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/631/2/022018>.

12) Hu, M., Ma, J., Sun, D., Hofko, B., Mirwald, J., Zheng, Y., Xu, L. (2022) Quantifying Weathering-Aging Test Parameters of High Viscosity-Modified Asphalt by Establishing a Conversion Relationship with Standard PAV Aging. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(6), 04022089, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004228](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004228).

13) Derya, K., Topal, A., McNally, T. (2019) Correlation of Processing Parameters and Ageing with the Phase Morphology of Styrene-Butadiene-Styrene Block Co-Polymer Modified Bitumen. *Materials Research Express*, 6(10), 105309, <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab349c>.

14) Nivitha, M.R., Devika, R., Murali Krishnan, J., Roy, N. (2022) Influence of Bitumen Type and Polymer Dosage on the Relaxation Spectrum of Styrene-Butadiene-Styrene (SBS)/Styrene-Butadiene (SB) Modified Bitumen. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 1(20), 143, <https://doi.org/10.1007/s11043-021-09531-y>.

15) Keyf, S. (2018) The Modification of Bitumen with Styrene-Butadiene-Styrene, Ethylene Vinyl Acetate and Varying the Amount of Reactive Ethylene Terpolymer. *Journal of Elastomers & Plastics*, 50(3), 241-255, <https://doi.org/10.1177/0095244317708590>.

16) Jianhui, X., Tian, X., Li, Zh., Bo, Y., Mingbo, Y. (2018) Correlation Between Phase Separation and Rheological Behavior in Bitumen/SBS/PE Blends. *RSC Advances*, 8(73), 41713-41721, <https://doi.org/10.1039/C8RA08944B>.

17) Mandrawalia, A.K., Gaur, A., Mittal, A. (2021) Investigation of Rheological and Performance Characteristics of Oxidized Polyethylene Polymer Blended with SBS Modified Bitumen. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1017(1), 012030, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1017/1/012030>.

18) Kök, B.V., Erkuş, Y., Yılmaz, M. (2021) Evaluation of the Cohesive Properties of SBS-Modified Binders at Low Temperatures. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 29(1), 21-27, <https://doi.org/10.2478/sjce-2021-0005>.

19) Zheng, C., Li, G., Xu, Y., Wang, D., LV, D. (2018) Analysis of the Effects of Ageing on the Cohesive Strength of Polymer-Modified Bitumen at Low Temperatures. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 13(2), 156-164, <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2018-13.410>.

20) Ratajczak, M., Wilmańsk, A. (2020) Evaluation of Laboratory Methods of Determination of SBS Content in Polymer-Modified Bitumens. *Materials*, 13(22), 5237, <https://doi.org/10.3390/ma13225237>.

21) Joohari, I.B., Maniam, S., Giustozzi, F. (2022) Enhancing the Storage Stability of SBS-Plastic Waste Modified Bitumen Using Reactive Elastomeric Terpolymer. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 16(4), <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00132-z>.

22) Jiang, Zh., Hu, Ch., Easa, S.M., Zheng, X., Zhang, Y. (2017) Evaluation of Physical, Rheological, and Structural Properties of Vulcanized EVA/SBS Modified Bitumen. *Journal of Applied Polymer Science*, 134(21), 44850, <https://doi.org/10.1002/app.44850>.

23) Singh, S.K., Kumar, Y., Ravindranath, S.S. (2018) Thermal Degradation of SBS in Bitumen During Storage: Influence of Temperature, SBS Concentration, Polymer Type and Base Bitumen. *Polymer Degradation and Stability*, 147, 64-75, <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.11.008>.

24) Pang, J., Du, S., Chang, R., Cui, D. (2016) Rheological Properties of SBS-Modified Asphalt in the Presence of Dithiodimorpholine and Tetraethyl Thiuram Disulfide. *Polymer Composites*, 37(3), 943-948, <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1082928>.

25) Le, H.T., Korolev, E.V., Grishina, A.N., Gladkikh, V.A. (2021) Reasons for Reduced Moisture Resistance of Sulfur-Extended Asphalt Concrete. *Materials*, 14, 7218, <https://doi.org/10.3390/ma14237218>.

26) GOST 33133-2014 Automobile roads of general use. Viscous road petroleum bitumens. Technical requirements. <https://docs.cntd.ru/document/1200121335?ysclid=lgjhyc7nu4143548187>.



- 27) GOST R 52056-2003 Polymer-bitumen binders for roads on the basis of block copolymers of styrene-butadiene-styrene type. Specifications.  
<https://docs.cntd.ru/document/1200032030?ysclid=lghjziacf3319234239>.
- 28) GOST 33136-2014 Automobile roads of general use. Viscous road petroleum bitumens. Method for determination of needle penetration depth.  
<https://docs.cntd.ru/document/1200122917?ysclid=lghk14k4j9301933849>
- 29) GOST 33142-2014 Automobile roads of general use. Viscous road petroleum bitumens. Determination of the softening point. Ring and Ball method.  
<https://docs.cntd.ru/document/1200121056?ysclid=lghk23modq138640015>.
- 30) GOST 33138-2014 Automobile roads of general use. Viscous road petroleum bitumens. Method for determination of tensile properties.  
<https://docs.cntd.ru/document/1200121337?ysclid=lghk2xccpf633879332>.
- 31) GOST 33143-2014 Automobile roads of general use. Viscous petroleum road bitumens. Method for determining the temperature of brittleness on Fraas.  
<https://docs.cntd.ru/document/1200121339?ysclid=lghk3uccv6517944676>.
- 32) GOST 33140-2014 Automobile roads of general use. Viscous road petroleum bitumens. Method for determining the aging under high temperature and air (method RTFOT).  
<https://docs.cntd.ru/document/1200121504?ysclid=lghk4r3uwq478670714>.
- 33) GOST 33137-2014 Automobile roads of general use. Viscous road petroleum bitumens. Method for determination of dynamic viscosity by rotational viscometer.  
<https://docs.cntd.ru/document/1200121503?ysclid=lghk5u88z6632495647>.
- 34) Zhang, F., Hu, C. (2017) Physical and Rheological Properties of Crumb Rubber/Styrene–Butadiene–Styrene Compound Modified Asphalts. *Polymer Composites*, 38(9), 1918-1927, <https://doi.org/10.1002/pc.23762>.
- 35) Singh, S.K., Kumar, Y., Ravindranath, S.S. (2018) Thermal Degradation of SBS in Bitumen During Storage: Influence of Temperature, SBS Concentration, Polymer Type and Base Bitumen. *Polymer Degradation and Stability*, 147, 64-75, <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.11.008>.
- 36) Zhang, F., Yu, J., Wu, Sh. (2012) Influence of Ageing on Rheology of SBR/Sulfur-Modified Asphalts. *Polymer engineering and science*, 52, 71-79, <https://doi.org/10.1002/pen.22047>.
- 37) Yang, L., Liu, K., Du, A. (2020) The Effect of Network Structure on Compressive Fatigue Behavior of Unfilled Styrene-Butadiene Rubber. *Advances in Materials Science and Engineering*, 20, 6729754, <https://doi.org/10.1155/2020/6729754>.
- 38) Entezam, M., Zarei, I., Khonakdar, H.A. (2022) Effect of Accelerator Solubility on the Curing Characteristics and Physico-mechanical Properties of SBR/NBR Blends: Correlation with Feeding Sequence and Blend Composition. *Polymer Bulletin*, 79(3), 1501-1519, <https://doi.org/10.1007/s00289-021-03576-2>.