



Research Article

Received: December 12, 2022

Accepted: December 22, 2022

Published: December 30, 2022

ISSN 2304-6295

## Asphalt concrete based on bituminous polysulfide binder, designed according to the volumetric method

Fomin, Alexey Yurievich<sup>1</sup> Khomyakov, Alexander Alexandrovich<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation; [fomin-al.78@mail.ru](mailto:fomin-al.78@mail.ru) (K.T.N.)

<sup>2</sup> Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation; [khoma\\_aa@mail.ru](mailto:khoma_aa@mail.ru) (postgraduate student)

### Keywords:

Modification; Sulfur; Bitumen; Asphalt concrete; Asphalt concrete mixture; Volumetric functional design system; Polysulfides

### Abstract:

**The purpose of this study** is the development of new asphalt mixes in the system of volumetric - functional design, using bituminous polysulfide binders (hereinafter - BPV) in their composition. **Research methods.** At the first stage, research was carried out on the BPV of various grades to determine the brittleness temperature by the Fraas method and the softening temperature using the ring and ball method. At the second stage, studies of BPW were carried out to establish its compliance with the requirements for binder grades according to PG. The following indicators were determined: flash point using the Cleveland open crucible method; dynamic viscosity, which is defined as the ratio between the applied shear stress and the shear rate of the bituminous binder; shear stability using the DSR dynamic shear rheometer, the method of determining which is to evaluate the shear stability of the bituminous binder by oscillating shear deformation of the sample and determining the values of the complex shear modulus and phase angle; bitumen and determining the effect of this impact on bitumen by comparing the physical and chemical parameters of bitumen obtained before and after exposure; aging temperature according to the PAV method, which consists in exposing samples of bituminous binders to elevated temperature and pressure in order to simulate aging processes during a period of operation in the pavement from 5 to 10 years; fatigue resistance, which is determined on a bituminous binder aged by the PAV method; low-temperature resistance, the method of determining which is to evaluate the low-temperature properties of the bituminous binder by determining the complex shear modulus in the frequency range at different temperatures and determining the stiffness values  $S(t)$  and the parameter  $m$ . At the final stage, the compositions of the asphalt concrete mix were selected, and tests were carried out for resistance to rutting by rolling a loaded wheel over a test sample at the required temperature and determining the rut depth after 10 000 load cycles (20 000 wheel passes) or until the limit value was reached. **Results.** Synthesized organic polysulfides based on sulfur and mixtures of higher fatty acids (hereinafter referred to as PS). The softening temperature of BPV with a polysulfide content of 25 and 40 wt.% is 50 and 54°C, and the brittleness temperature is -22 and -25°C, respectively. The combination of bitumen with PS makes it possible to obtain binders of a new composition with a set of property indicators corresponding to grades PG 58-40 and PG 52-34. The compositions of the SP-16 asphalt concrete mix based on industrially produced and bitumen-polysulfide binders have been selected. Comparative tests of asphalt concrete were carried out to determine their resistance to rutting by rolling a loaded wheel. It has been established that the depth of the rut of the control composition on the binder PG 70-28 is 1.26 mm, on bituminous polysulfide binders, depending on the content of polysulfide, it varies within 1.87 ... 2.62 mm. The obtained values of indicators meet the requirements of regulatory documents. It has been established that the introduction of polysulfide into bitumen makes it possible to lower the lower temperature limit PG of the binder, to increase its softening temperature and

Fomin, A.; Khomyakov, A.

Asphalt concrete based on bituminous polysulfide binder, designed according to the volumetric method; 2022; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **105** Article No 10512. doi: 10.4123/CUBS.105.12



the upper limit PG, respectively. The rut depth indicators of asphalt concrete on BPV meet the requirements for asphalt concrete used in extreme and difficult conditions.

## 1 Introduction

Асфальтобетонные покрытия являются наиболее востребованными как в России, так и за рубежом. Результаты исследований свойств и технических характеристик различных асфальтобетонов, в том числе на основе полимерно-битумных вяжущих, с применением местных заполнителей и др., отражены в работах [1–5].

В современных условиях высоких транспортных нагрузок на дорожные покрытия становится необходимым применение многощебенистых асфальтобетонов и развитие научного направления по разработке асфальтобетонов, проектируемых в системе объемно-функционального проектирования.

Метод объемно – функционального проектирования асфальтобетонных смесей направлен на решение следующих проблем покрытий автомобильных дорог:

1. Сдерживание пластической колеи, которая является следствием недостаточной прочности асфальтобетона на сдвиг в летнее время;

2. Предотвращение образования трещин, образующихся в результате хрупкости вяжущего в зимний период, что обусловлено внутренними напряжениями растягивающего характера, превышающих прочность на растяжение асфальтобетона в условиях отрицательных температур.

Методу объемного проектирования, адаптированному к условиям Российской Федерации и являющегося аналогом известной системы проектирования «Superpave», посвящены результаты многих исследований.

К примеру, в Северной Корее были установлены корреляционные зависимости между битумами различных марок и марками по PG, а также исследована устойчивость асфальтобетонов на данных битумах к проявлению истираемости и растрескиванию [6].

В работе [7] описывается устройство покрытий из асфальтобетонных смесей «Superpave» в штате Флорида (США).

В исследованиях [8] изучены технологические характеристики уплотнения асфальтобетонных смесей «Superpave» на мезомасштабном уровне, а в исследованиях [9] подробно изучаются сходства и различия методов проектирования асфальтобетонных смесей по Маршаллу и «Superpave».

В работе [10] описывается влияние «зоны ограничения» на объемные и уплотняющие свойства асфальтобетонных смесей, спроектированных по методу «Superpave». в том числе в зависимости от гранулометрии минеральной части, при устройстве асфальтобетонных смесей в штате Флорида (США).

Авторы [11] проводили полевые и лабораторные испытания смесей «Superpave», которые количественно описывают их реакцию на вибрационную нагрузку при уплотнении с использованием сенсоров Smart Rock. Данные сенсоры используются для измерения динамического отклика асфальтобетонного покрытия и вибрационного барабана дорожного катка во время уплотнения асфальтобетонной смеси.

В работе [12] проанализировано влияние температуры и способа уплотнения на свойства асфальтобетонных смесей, спроектированных по объемному методу.

В работе [13] определена характеристика движения частиц минерального заполнителя при формировании образцов в гираторном (вращательном) уплотнителе, а в исследованиях [14] приведены характеристики уплотнения асфальтобетонных смесей в зависимости от гранулометрии минеральной части.

В Гане (Африка), были собраны данные по средней температуре окружающего воздуха за 42 года (1979-2020 гг.) с 24 климатических станций, а также средняя температура асфальтобетонного покрытия и определены наиболее подходящие марки битумного вяжущего для разных регионов страны с целью сдерживания дефектов в виде усталостных трещин и пластической колеи на асфальтобетонных покрытиях [15].

В Египте разработана региональная схема внедрения системы проектирования асфальтобетонных смесей по объемному методу, с целью их применения в странах с жарким и засушливым климатом [16].



Установлено, что использование модифицированного битума «Buton» (Китай) при приготовлении асфальтобетонных смесей способствует повышению прочностных характеристик асфальтобетона при высоких температурах, а также его водостойкости [17].

Последние разработки в области методов испытаний битумных вяжущих описываются в работе [18], а в работе [19] проанализирован метод Бейли (США) при подборе зернового состава асфальтобетонной смеси и сравнение технических характеристик данной смеси с асфальтобетонной смесью, подобранной по объемному методу.

Авторы [20] оценивают пригодность составов асфальтобетонных смесей, спроектированных по методу «Supergave» для климатических условий Таиланда.

В работе [21] описывается применение заполнителя из горючего сланца в составах асфальтобетонных смесей, а в работе [22] приводится оценка эффективности асфальтобетонных смесей, спроектированных по методу «Supergave», для соответствия климатическим и дорожным условиям Иордании.

Исследования [23] описывают разработку метода по определению расчетного числа оборотов гираторного уплотнителя, который оптимизирует характеристики асфальтобетонной смеси в отношении устойчивости к колееобразованию и усталостному растрескиванию.

В работе Российских ученых Кирюхина Г.Н., Джуманова Р.Б. приведены плюсы и минусы системы проектирования «Supergave», а также сведения о необходимости более глубоких исследований в данной системе [24]. Рассмотрены технологические особенности подбора и проектирования асфальтобетонной смеси, составлена соответствующая блок-схема [25].

Известно, что свойства битумного вяжущего являются основным фактором качества и долговечности асфальтобетона. Поэтому основным этапом метода объемно-функционального проектирования (подбора битумного вяжущего) является обеспечение его верхней и нижней температурных границ работоспособности. Классификация PG позволяет выбрать битумное вяжущее для конкретного участка дороги, а его выбор основан на климатических характеристиках в определенном районе строительства.

Марка вяжущего закрепляется условным обозначением PG X – Y, где X – значение, численно равное максимальной допустимой температуре эксплуатации битумного вяжущего, а Y – значение, равное минимальной допустимой температуре эксплуатации. Например, для условий Татарстана и соседних регионов применяемыми марками вяжущих являются PG 58-28 или PG 70-28.

В большинстве случаев, температурный интервал работы вяжущих регулируется введением в битум добавок из класса эластомеров и ПАВ (СБС, синтетические каучуки, кислоты и т.д.), в основном импортного производства.

Зарубежные исследования данных добавок и асфальтобетонных смесей на их основе представлены в работах [26–28].

В работе [26] описывается исследование двух типов вяжущих ПБВ для восстановленного асфальтобетонного покрытия с добавлением переработанного асфальтобетона (RAP). В ходе исследования были отобраны два образца переработанного асфальтобетона: один с городской автомагистрали (RAP-A), другой с загородной трассы (RAP-S). Битумное вяжущее, извлеченное из асфальтобетонов RAP-A и RAP-S, имело разную вязкость, реологические и химические характеристики. В исследованиях установлено, что асфальтовое вяжущее, полученное из асфальтобетона RAP-A, является более жестким, в сравнении с асфальтобетоном RAP-S. Суть исследования заключалась в том, что ПБВ смешивали в различных пропорциях с битумным вяжущим, извлеченным из асфальтобетонных смесей RAP-A и RAP-S. Далее были проведены различные испытания, а именно: определение пенетрации, температуры размягчения, вязкости, пластичности и эластичности. Кроме того, на основе испытаний динамического сдвигового реометра (DSR) и реометра изгиба балки (BBR) были определены высокотемпературные и низкотемпературные характеристики ПБВ, смешанного с вяжущими из асфальтобетонов RAP. Результаты исследования физических свойств модифицированного битума показали, что добавление вяжущих из переработанного асфальтобетона незначительно сказалось на характеристиках ПБВ. Добавление 15% битума из асфальтобетона RAP увеличило верхнюю границу марки PG ПБВ всего лишь на один интервал (с PG 76 до PG 82). Аналогичный результат наблюдался и после добавления 40% битума из переработанного асфальтобетона RAP. Что касается нижней границы марки PG, то она не изменилась с добавлением связующих из переработанных асфальтобетонов.



Целью работы [27] было выявление тех характеристик битума, которые оказывают наибольшее влияние на низкотемпературные прочностные характеристики асфальтобетонной смеси. Разработана модель множественной регрессии, которая подразумевает, что температура, при которой наступает разрушение асфальтобетона, зависит как от реологических свойств битума, так и от его содержания в смеси. Это говорит о том, только комплексная оценка свойств битума позволяет обоснованно оценить его низкотемпературные характеристики.

Наибольший интерес представляет работа [28], где исследуются реологические и адгезионные свойства битумных вяжущих, модифицированных гибридными полимерами на основе поливинилхлорида (ПВХ) и СБС. Результаты исследования показывают, что при добавлении 1% ПВХ в битум марка PG увеличивается на один интервал (6°C), и на два интервала (12°C) при добавлении 3% ПВХ. При совместном использовании ПВХ и СБС в количестве 1% и 3% марка PG увеличивается на три интервала (18°C), а при использовании добавок в количестве 3%, марка PG увеличивается на четыре интервала, и достигает 88°C при начальной верхней границе марки PG 64°C.

Учитывая важность свойств битумного вяжущего в составе асфальтобетона, а также описанные выше исследования, можно утверждать о том, что равноэффективными свойствами обладают и органические полисульфиды, введение которых в битум позволяет получить БПВ, способные заменить традиционно выпускаемые эластомеры, применяемые вяжущих PG. Так, в работе Фомина А.Ю. [29] установлена эффективность применения БПВ в плотных мелкозернистых асфальтобетонах, классифицируемых по ГОСТ 9128-2013 [30]. В том числе установлено, что полисульфиды в битуме улучшают его физико-механические характеристики: повышают температуру размягчения и снижают температуру хрупкости, расширяя тем самым температурный интервал работоспособности асфальтобетона.

В современных условиях, в связи с переходом на новые стандарты в области проектирования асфальтобетонов, актуальна новая научная задача, а именно разработка состава и исследование свойств многощебенистых асфальтобетонных смесей с крупностью зерен заполнителя от 16 мм, классифицируемых по маркам SP и SMA. При этом в качестве заполнителя в необходимо использовать щебень из пород габбро, габбро-диабаз, диорита, что является дополнительным фактором упрочнения асфальтобетонных покрытий и сдерживания образования колееизноса на них, при эксплуатации в зимний период [31–33].

С учетом свойств органических полисульфидов, а также в условиях отсутствия исследований битумполисульфидных вяжущих в системе объемно-функционального проектирования асфальтобетонов, актуальной и новой задачей является разработка асфальтобетонов с применением БПВ в их составе, что позволит сдерживать пластические деформации и повышать трещиностойкость покрытий, а также исключить применение зарубежных модификаторов в составе асфальтобетона.

## 2 Materials and Methods

Для установления максимального эффекта БПВ, в качестве основного состава асфальтобетонной смеси была запроектирована и подобрана смесь SP-16, поскольку данный тип используется в основном при устройстве слоёв покрытий, эксплуатируемых в тяжелых и экстремальных условиях. Были подобраны составы с использованием битумного вяжущего марки PG 70-28 производства ОАО «Алексеевскдорстрой» (Республика Татарстан) и экспериментальных БПВ.

Состав БПВ включает битум марки БНД 70/100 и органический полисульфид. Использовались следующие составы битумполисульфидных вяжущих: БПВ-10, БПВ-25 и БПВ-40, с соответствующим содержанием полисульфида в них (10%, 25% и 40 масс.%).

Сополимеризацию серы и высших жирных кислот при синтезе органических полисульфидов проводили при термическом иницировании. Технологически получение полисульфидов заключается в нагревании исходных компонентов до заданной температуры (плавлении серы) и их дальнейшем смешивании (рисунок 1).



**Fig. 1 – Synthesis process of organic polysulfide**

В минеральной части асфальтобетонной смеси использовались материалы: щебень и отсев дробления горных пород, производства ООО «Карьер Щелейки». Зерновой состав асфальтобетонной смеси представлен в таблице 1.

**Table 1. Composition of asphalt mix SP-16**

№п/п	Наименование материалов	Нормативный документ	Содержание компонентов, %
1	Щебень фр. 11.2-16 мм, М1400	ГОСТ 32703-2014	16.3
2	Щебень фр. 8-11.2 мм, М1400	ГОСТ 32703-2014	28.0
3	Щебень фр. 4-8 мм	ГОСТ 32730-2014	13.9
4	Песок дробленный фр. 0-4 мм	ГОСТ 32730-2014	34.1
5	Минеральный порошок МП-1	ГОСТ 32761-2014	3.8
6	Битумное вяжущее PG 70-28	ГОСТ 58400.1-2019 ГОСТ 58400.2-2019	3.9
7	Битумполисульфидные вяжущие: БПВ-10, БПВ-25 и БПВ-40	-	3.9

На первом этапе были исследованы свойства БПВ-10, БПВ-25 и БПВ-40. Определялись показатели температуры размягчения и хрупкости в соответствии с методиками [34–35].

На втором этапе были проведены исследования БПВ с целью установления его соответствия требованиям, предъявляемым к маркам вяжущих по PG. Определялись показатели температуры вспышки, динамическая вязкость, сдвиговая устойчивость, окислительное старение по методу RTFOT, в том числе изменение массы после старения, сдвиговая устойчивость, температура старения по методу PAV, усталостная устойчивость и низкотемпературная устойчивость [36–42].

Основная концепция выбора вяжущего, при проектировании состава асфальтобетона по объёмно – функциональному методу состоит в следующем:

1. Смесь должна содержать достаточно много вяжущего с учетом адсорбции его части открытыми порами на поверхности минеральных зерен, чтобы все минеральные частицы были им покрыты;

2. Вяжущего должно быть достаточно для обеспечения долговечности покрытия при окислительном старении и увлажнении [43].

Оптимальное количество вяжущего подбирают так, чтобы количество пор и пустот в уплотненной асфальтобетонной смеси соответствовало требованиям ГОСТ Р 58401.1-2019 [44].

Показатель воздушных пустот ( $V_a$ ), должен составлять  $4.0 \pm 0.3\%$  при проектировании состава смеси в лабораторных условиях, и  $4.0 \pm 1.5\%$  при подборе состава на асфальтобетонном заводе.

Исходные материалы нагревали и перемешивали в автоматическом обогреваемом лабораторном смесителе принудительного действия для получения асфальтобетонной смеси. После этого производили формование образцов асфальтобетона диаметром 150мм (рисунок 2, 3) в автоматическом уплотнителе (гираторе) в соответствии с ГОСТ Р 58401.13-2019 [45] при 100 оборотах вращения, под углом  $1,16^\circ$  и действующей нагрузке 600 кПа (рисунок 4). В нашем случае использовался вращательный уплотнитель Troxler Super Pave Compactor 5850.



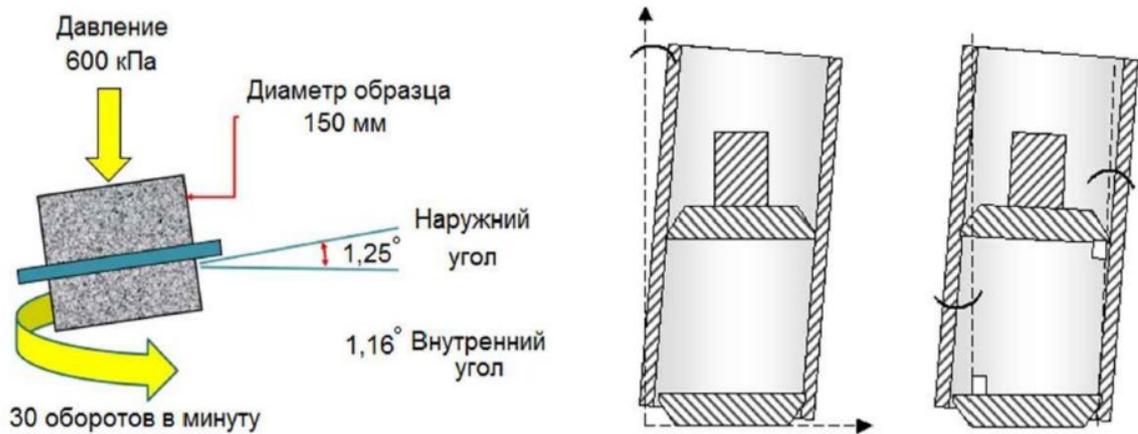
**Fig. 2 – Prepared samples of asphalt mix SP-16 on a gyratory compactor Troxler Super Pave Compactor 5850**



**Fig. 3 – Samples of asphalt concrete grade SP-16 in a cut.**

Fomin, A.; Khomyakov, A.

Asphalt concrete based on bituminous polysulfide binder, designed according to the volumetric method; 2022; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **105** Article No 10512. doi: 10.4123/CUBS.105.12



**Fig. 4 – The principle of operation of a gyratory compactor**

Исследования асфальтобетона на устойчивость к колееобразованию проводились через 48 часов после приготовления образцов на установке InfraTest 20-4000, с термостатированием в воздушной среде при температуре 60°C, в «сухих» условиях (рисунок 5) [46]. Сущность метода заключается в прокатывании нагруженного колеса по испытуемому образцу при требуемой температуре и определении глубины колеи после 10 000 циклов нагрузки (20 000 прокатываний) или до достижения предельного значения.

При выполнении испытания были соблюдены следующие условия:

- температура ( $22 \pm 3$ )°C;
- относительная влажность не более 80%.

После формования два образца выдерживались сутки в естественных условиях при температуре окружающего воздуха. На следующий день образцы нарезались камнерезным станком на две половины толщиной по 5 сантиметров каждая для того, чтобы без проблем можно было произвести установку образцов в форму для испытания.

После подготовки образцов к испытанию они высушивались в естественных условиях при температуре окружающего воздуха в течение 24 часов и по прошествии 48 часов, как было сказано выше, проводилось испытание.



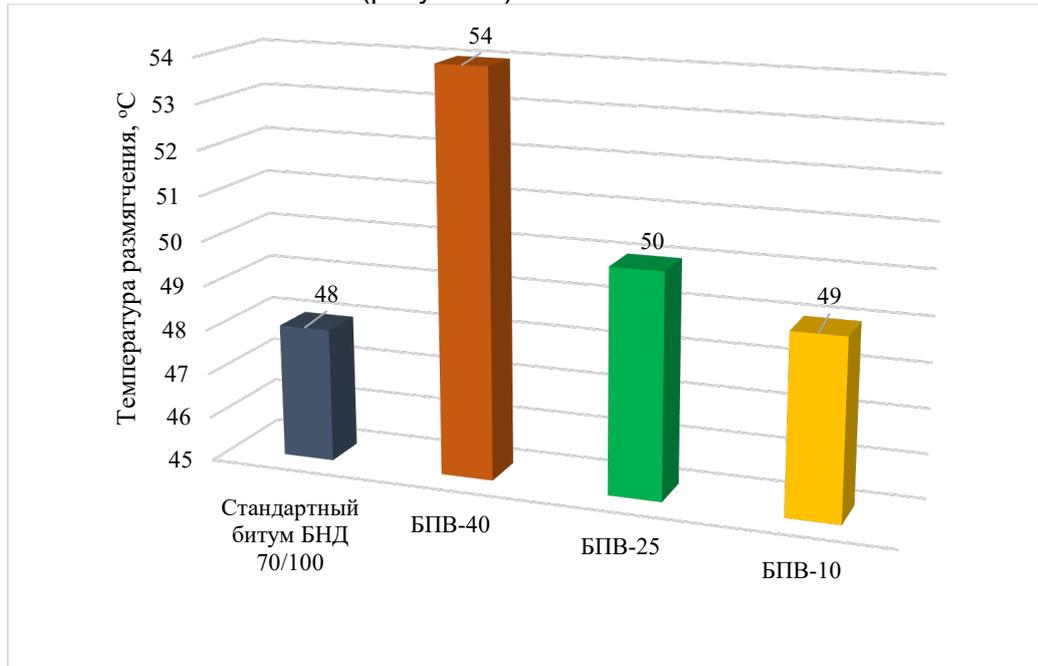
**Fig. 5 – Rutting Testing Machine with an Asphalt Concrete Sample Installed**

### 3 Results and Discussion

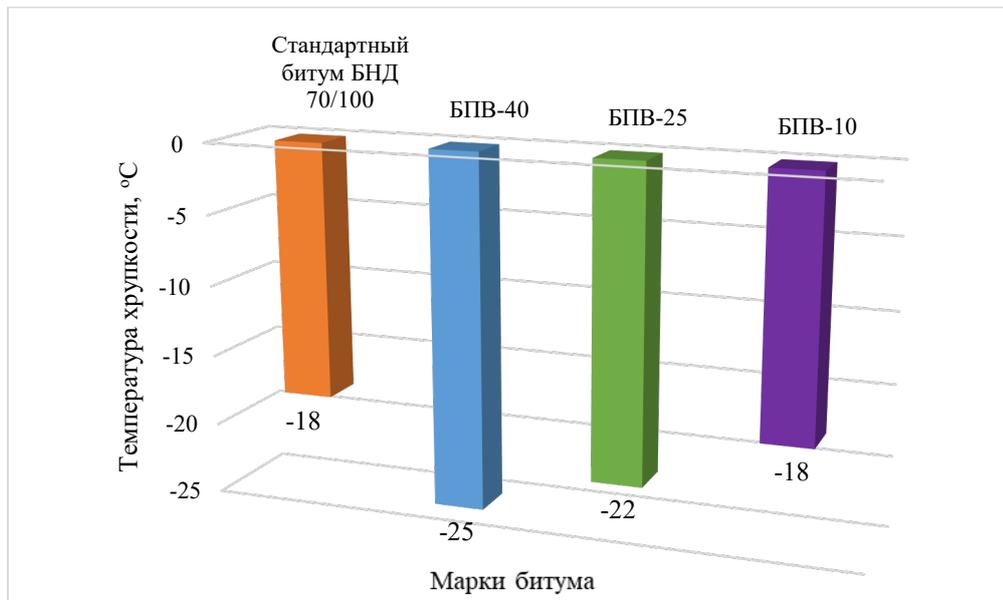
На начальном этапе были проведены исследования образцов БПВ с содержанием полисульфида в количестве 10, 25 и 40 масс. %.

Установлено, что температура размягчения БПВ, с содержанием полисульфида 25 и 40 масс. % составляет 50 и 54°C соответственно, что на 24 и 27 % выше аналогичного показателя контрольного образца битума БНД 70/100 (рисунок 5). При этом температура размягчения образца БПВ-10 незначительно отличается от значения контрольного образца, поэтому все дальнейшие исследования производились на вяжущих БПВ-25 и 40.

Температура хрупкости БПВ, с содержанием полисульфида 25 и 40 масс. % понижается и составляет соответственно -22 и -25°C (рисунок 6).



**Fig. 6 – The results of determining the softening temperature for the ring and ball samples of bituminous polysulfide binder**



**Fig. 7 - The results of determining the brittleness temperature of samples of bituminous polysulfide binder**

Далее производились исследования свойств БПВ с целью определения их температурного диапазона работоспособности на предмет их соответствия маркам вяжущих по PG. Испытания проводились на исходных БПВ 25 и 40, а также состаренных по методам RTFOT и PAV. Так, для

БПВ-40 верхняя граница температурного диапазона составила 61.8°...62.3°С. При определении же нижней границы цикл испытания закончился на отметке температуры в -40°С. При этом полученное фактическое значение, вероятно, не является предельно возможным, не характеризует полностью низкотемпературных свойств вяжущего, а обусловлено ограниченным диапазоном измерений прибора – реометра. Поэтому установление истинного значения нижней температурной границы вяжущего не представлялось возможным. Таким образом, марка битумполисульфидного вяжущего БПВ-40 составила PG58-40 (таблица 2).

Стоит также отметить, что в сравнении с ранее упомянутыми исследованиями, где в качестве модификаторов битумного вяжущего использовался поливинилхлорид, а также распространенный СБС, органический полисульфид показал лучшие результаты,

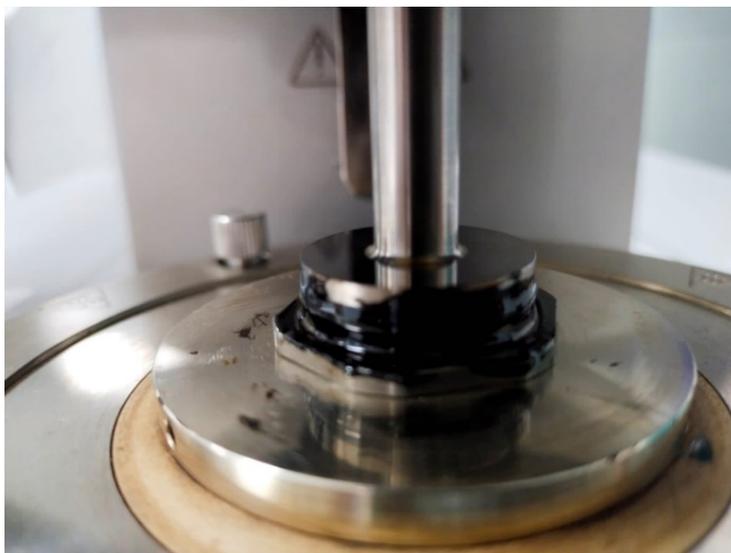


Fig. 8 - Determination of the PG grade of a bituminous polysulfide binder using a dynamic shear rheometer DSR

Table 2. The results of determining the brand BPV-40

Наименование показателя	Фактическое значение	Требования ГОСТ Р 58400.1-2019
Температура вспышки, °С	251	Не ниже 230
Динамическая вязкость при - 1350С, Па*с	Не более 3.0	2.07
<b>Верхняя граница марки PG, X1</b>	<b>Сдвиговая устойчивость, G'/sinδ</b>	<b>Требования ГОСТ Р 58400.1-2019</b>
58°С	1.558кПа	Не менее 1 кПа
64°С	0.765 кПа	
<b>Верхняя граница марки PG, X2 (RTFOT)</b>	<b>Сдвиговая устойчивость, G'/sinδ</b>	<b>Требования ГОСТ Р 58400.1-2019</b>
58°С	3.602 кПа	Не менее 2.2 кПа
64°С	1.807 кПа	

Испытания БПВ-25 показали его соответствие марке PG 52-34 (таблица 3).

Table 3. The results of determining the brand BPV-25

Наименование показателя	Фактическое значение	Требования ГОСТ Р 58400.1-2019
Температура вспышки, °С	249	Не ниже 230
Динамическая вязкость при - 135°С, Па*с	Не более 3.0	1.001



Верхняя граница марки PG, X1	Сдвиговая устойчивость, $G^*/\sin\delta$	Требования ГОСТ Р 58400.1-2019	Нижняя граница марки PG, Y1	Сдвиговая устойчивость, $G^*/\sin\delta$	Требования ГОСТ Р 58400.1-2019
58°C 52°C	0.6132 кПа 1.230 кПа	Не менее 1 кПа	19°C 16°C 13°C 10°C	2008 кПа 3007 кПа 4464 кПа 6557 кПа	Не более 5000 кПа
Верхняя граница марки PG, X2 (RTFOT)	Сдвиговая устойчивость, $G^*/\sin\delta$	Требования ГОСТ Р 58400.1-2019	Нижняя граница марки PG, Y2	Жесткость, S; Параметр m	Требования ГОСТ Р 58400.1-2019
58°C 52°C	1.780кПа 4.385 кПа	Не менее 2.2 кПа	-18°C -24°C -30°C	S=102МПа m=0.388 S=164 МПа m=0.320 S=207 МПа m=0.291	Жесткость, S, не более 300 МПа Параметр m, не более 0.3

Сравнительные испытания стойкости асфальтобетонов к пластическим деформациям показали положительные результаты на стандартном вяжущем PG 70-28 и БПВ. Так, для асфальтобетонов на БПВ-25 и БПВ-40 глубина колеи составила 2.62 и 1.87 мм соответственно после 20 000 циклов проходов нагруженного колеса, что соответствует требованиям ГОСТ для эксплуатации асфальтобетонных покрытий в тяжелых и экстремальных условиях (таблица 4,5,6; рисунки 9,10,11,12).

Из кинетических кривых колееобразования на рисунках 9, 10 и 11 видно, что наиболее интенсивный рост глубины колеи наблюдается у асфальтобетонов на БПВ-25 и 40. Так, средняя глубина колеи после 10 000 циклов проходов составляет 1.63 и 1.56 соответственно, что на 37 и 40% выше аналогичного показателя для контрольного состава.

Полученные данные характеризуют асфальтобетоны на БПВ как материалы менее чувствительные к низкотемпературным воздействиям, что коррелирует с данными испытаний БПВ по определению нижней температурной границы вяжущего по PG.

**Table 4. Rutting test results for SP-16 asphalt mix with PG 70-28 bituminous binder**

Образец	Глубина колеи, мм	Среднее значение, мм	Диапазон, мм	Требования ГОСТ Р 58406.3-2020	
Лево	-1.23	-1.26	0.06	Тяжелые условия эксплуатации (Т)	Экстремальные условия эксплуатации (Э)
Право	-1.29			Не более 3.5мм	Не более 2.5мм



Fig. 9 - The results of determining the resistance to rutting by rolling a loaded wheel of an asphalt concrete mixture on a bituminous binder PG 70-28

Table 5. The results of the test for resistance to rutting of the asphalt mix SP-16 on BPV-40

Образец	Глубина колеи, мм	Среднее значение, мм	Диапазон, мм	Требования ГОСТ Р 58406.3-2020	
Левое	-2.24	-1.87	0.75	Тяжелые условия эксплуатации (Т)	Экстремальные условия эксплуатации (Э)
Правое	-1.49			Не более 3.5мм	Не более 2.5мм

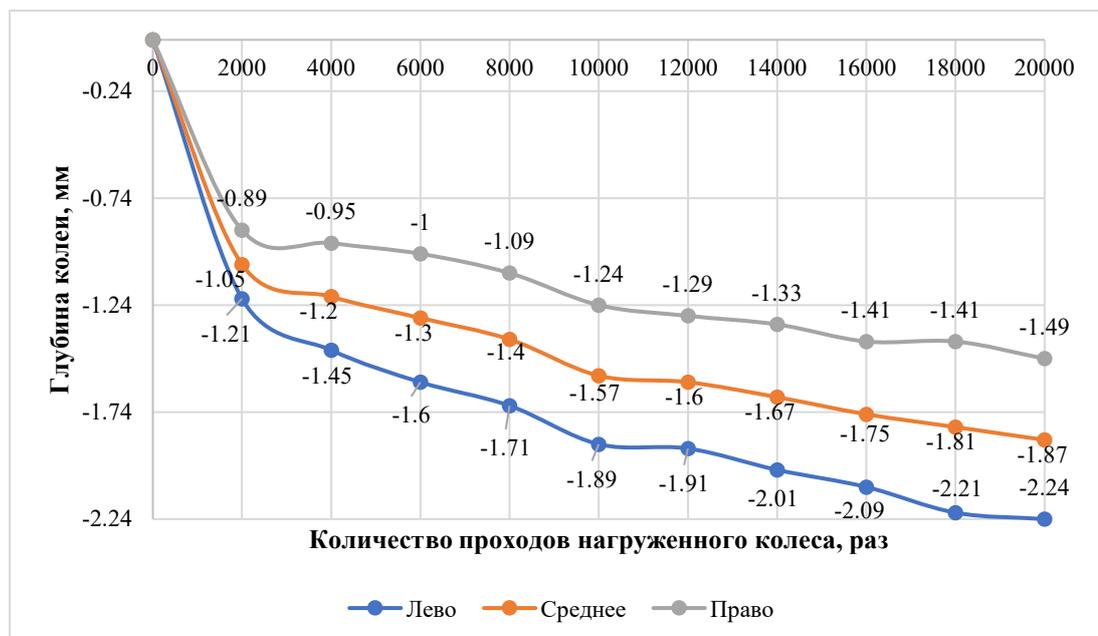
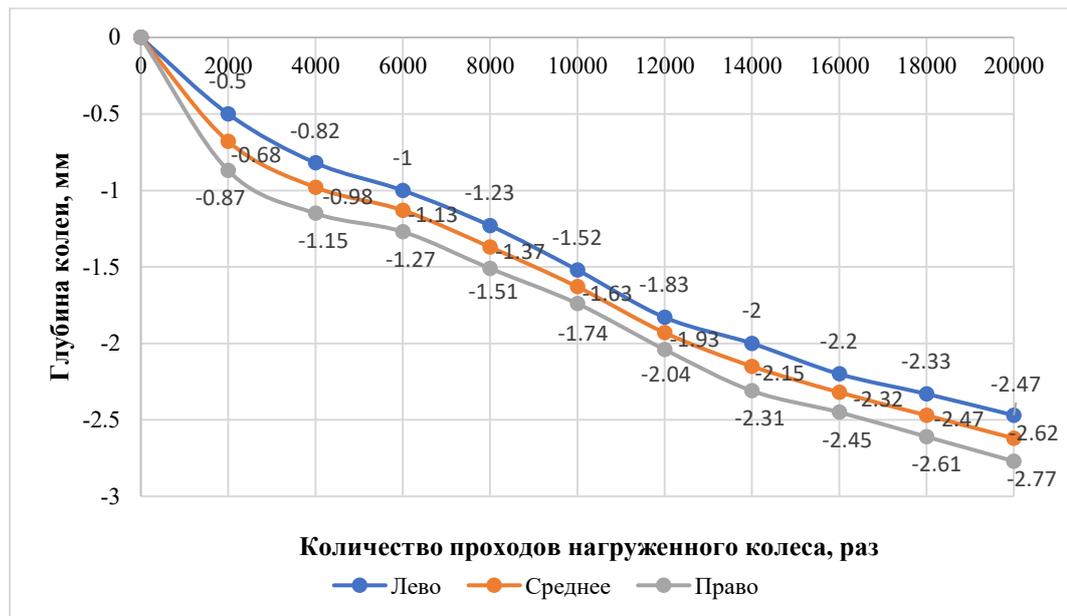


Fig. 10 – The results of determining the resistance to rutting by rolling a loaded wheel of an asphalt concrete mixture on BPV-40

**Table 6. The results of the test for resistance to rutting of the asphalt mix SP-16 on BPV-25**

Образец	Глубина колеи, мм	Среднее значение, мм	Диапазон, мм	Требования ГОСТ Р 58406.3-2020	
Лево	-2.47	-2.62	0.30	Тяжелые условия эксплуатации (Т)	Экстремальные условия эксплуатации (Э)
Право	-2.77			Не более 3.5мм	Не более 2.5мм

**Fig. 11 – The results of determining the resistance to rutting by rolling a loaded wheel of an asphalt concrete mixture on BPV-25****Fig. 12 – Asphalt concrete samples SP-16 on BPV-25 bitumen after rutting test**

Полученные результаты позволяют предположить, что асфальтобетоны на БПВ-25 и БПВ-40, могут быть востребованы для устройства верхних слоев покрытий на автомобильных дорогах, эксплуатируемых в европейской части России и в районах с холодным климатом.

## 4 Conclusions

1. Синтезированы органические полисульфиды на основе серы и высших жирных кислот.

Fomin, A.; Khomyakov, A.

Asphalt concrete based on bituminous polysulfide binder, designed according to the volumetric method; 2022; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **105** Article No 10512. doi: 10.4123/CUBS.105.12



2. Изучен метод проектирования и подбора составов асфальтобетонных смесей в системе объемно – функционального проектирования. Определена актуальность исследования битумполисульфидных вяжущих в составе многощебеночных асфальтобетонов.

3. Установлено, что, согласно требованиям ГОСТ Р 58400.1-2019, вяжущие БПВ-25 и БПВ-40 соответствуют маркам PG 52-34 и PG 58-40.

4. Установлено, что глубина колеи асфальтобетонов марки SP-16 на битумполисульфидных вяжущих БПВ-25 и БПВ-40 составляет 1.87 и 2.62 мм, что отвечает требованиям, предъявляемым к асфальтобетонам, эксплуатируемым в экстремальных и тяжелых условиях.

## 5 Acknowledgements

Выражаю особую благодарность моему научному руководителю Фомину Алексею Юрьевичу, доценту, кандидату технических наук, директору Института транспортных сооружений Казанского Государственного Архитектурно – Строительного Университета, за значимые замечания и важнейшие советы при проведении исследований и оформлении данной статьи.

Выражаю признательность ОАО «Алексеевскдорстрой» в лице директора Саттарова Марата Дамировича, за предоставленные материалы для исследований.

Выражаю благодарность коллегам, ООО «Управление производственно-технической комплектации» (ООО «УПТК», г. Казань), поддерживавших меня и дававших советы по написанию статьи.

## References

1. Nikolaev, A. G. Investigation of the durability of asphalt concrete based on low-strength crushed stone reinforced with sulfur / A. G. Nikolaev, A. Yu. Fomin, V. G. Khozin // Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. - 2015. - No. 2 (32). - S. 256-260. [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_24059691\\_47084023.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_24059691_47084023.pdf)
2. Khafizov, E. R. The use of polymer-asphalted concrete coatings on the roads of the Republic of Tatarstan / E. R. Khafizov, A. Yu. Fomin // Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. - 2015. - No. 4 (34). - S. 312-316. [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_24853107\\_70706002.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_24853107_70706002.pdf)
3. Khafizov E. R., Vdovin E. A., Ilyina O. N., Fomin A. Yu. Studies of the physical and mechanical properties of multi-crushed asphalt concrete based on polymer-bitumen binders // Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. - 2016. - No. 1 (35). - S. 211-215. <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovaniya-fiziko-mehanicheskikh-svoystv-mnogoschebenistyh-asfaltobetonov-na-osnove-polimerno-bitumnyh-vyazhuschih/viewer>
4. Fomin, A. Yu. New sulfur-containing materials for road construction / A. Yu. Fomin, V. G. Khozin // Construction materials. - 2016. - No. 12. - P. 80-82. [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_27656935\\_23919351.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_27656935_23919351.pdf)
5. Fomin, A. Yu. Asphalt concrete for road works based on low-grade crushed stone reinforced with sulfur / A. Yu. Fomin // Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. - 2017. - No. 4 (42). - S. 314-320. [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_30604729\\_96022622.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_30604729_96022622.pdf)
6. Lee J.S. et al. Asphalt binder performance grading of North Korea for Superpave asphalt mix-design // Int. J. Pavement Res. Technol. Chinese Society of Pavement Engineering, 2018. Vol. 11, No. 6. P. 647–654. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2018.06.004>.
7. Ali H., McCarthy L.M., Welker A. Performance of hot in-place recycled Superpave mixtures in Florida, Constr. Build. mater. Elsevier Ltd, 2013. Vol. 49. P. 618–626. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.043>.
8. Dan H.C. et al. Meso-scale study on compaction characteristics of asphalt mixtures in Superpave gyratory compaction using SmartRock sensors // Constr. Build. mater. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 262. P. 120874. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120874>.
9. Han D., Wei L., Zhang J. Experimental Study on Performance of Asphalt Mixture Designed by Different Method // Procedia Eng. Elsevier B.V., 2016. Vol. 137. P. 407–414. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.275>.
10. Al-Khateeb G.G., Ghuzlan K.A., Al-Barqawi M.O. Effect of Superpave restricted zone on volumetric and compaction properties of asphalt mixtures // Int. J. Pavement Res. Technol. Chinese Society of Pavement Engineering, 2017. Vol. 10, No. 6. P. 488–496. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.03.004>.

Fomin, A.; Khomyakov, A.

Asphalt concrete based on bituminous polysulfide binder, designed according to the volumetric method; 2022; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **105** Article No 10512. doi: 10.4123/CUBS.105.12



11. Dan H.C. et al. Experimental investigation on dynamic response of asphalt pavement using SmartRock sensor under vibrating compaction loading // *Constr. Build. mater.* Elsevier Ltd, 2020. Vol. 247. P. 118592. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118592>.
12. Perez-Jiménez F. et al. Effect of compaction temperature and procedure on the design of asphalt mixtures using Marshall and gyratory compactors // *Constr. Build. mater.* 2014. Vol. 65. P. 264–269. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.135>
13. Wang X. et al. Characterization of particle movement in Superpave gyratory compactor at meso-scale using SmartRock sensors // *Constr. Build. mater.* Elsevier Ltd, 2018. Vol. 175. P. 206–214. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.146>.
14. Zhang C. et al. Compaction characteristics of asphalt mixture with different gradation type through Superpave Gyratory Compaction and X-Ray CT Scanning // *Constr. Build. mater.* Elsevier Ltd, 2016. Vol. 129. P. 243–255. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.098>.
15. Tutu, K. A., Ntramah, S., & Tuffour, Y. A. (2022). Superpave performance graded asphalt binder selection for asphalt mixture design in Ghana. *ScientificAfrican*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01348>.
16. Khedr, S., & Saady, M. (2023). Development of superpave regional implementation framework in developing countries with hot and arid climates: Egyptian case study. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01772. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01772>.
17. Liu, S., Cao, W., Li, X., Li, Z., & Sun, C. (2018). Principle analysis of mix design and performance evaluation on Superpave mixture modified with Buton rock asphalt. *Construction and Building Materials*, 176, 549–555. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.05.045>.
18. Zeiada, W., Liu, H., Ezzat, H., Al-Khateeb, G. G., Shane Underwood, B., Shanableh, A., & Samarai, M. (2022). Review of the Superpave performance grading system and recent developments in the performance-based test methods for asphalt binder characterization. *Construction and Building Materials*, 319, 126063. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.126063>.
19. Ghuzlan, K. A., Al-Mistarehi, B. W., & Al-Momani, A. S. (2020). Rutting performance of asphalt mixtures with gradations designed using Bailey and conventional Superpave methods. *Construction and Building Materials*, 261, 119941. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.119941>.
20. Jitsangiam, P., Chindaprasit, P., & Nikraz, H. (2013). An evaluation of the suitability of SUPERPAVE and Marshall asphalt mix designs as they relate to Thailand's climatic conditions. *Construction and Building Materials*, 40, 961–970. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.11.011>.
21. Azzam, M. O. J., & Al-Ghazawi, Z. (2015). Evaluation of incorporating oil shale filler aggregate into hot mix asphalt using Superpave mix design. *Construction and Building Materials*, 101, 359–379. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.10.071>.
22. Asi, I. M. (2007). Performance evaluation of SUPERPAVE and Marshall asphalt mix designs to suite Jordan climatic and traffic conditions. *Construction and Building Materials*, 21(8), 1732-1740. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2006.05.036>.
23. Khosla, N. P. & Ayyala, D. (2013). A Performance-based Evaluation of Superpave Design Gyration for High Traffic Surface Mixes. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 104, 109–118. <https://doi.org/10.1016/J.SBSPRO.2013.11.103>.
24. Kiryukhin, G. N. Pros and cons of the Superpave asphalt concrete design system / G. N. Kiryukhin, R. B. Dzhumanov // Association of Asphalt Concrete Researchers: Collection of articles and reports of the Annual Scientific Session, Moscow, January 01 - 31, 2014 of the year. - Moscow: Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 2014. - P. 72-83. <http://www.vptechnologiesllc.com/files/Superpave.pdf>
25. Trautvain A.I., Akimov A.E., Denisov V.P., Lashin M.V. Features of the method of volumetric design of asphalt concrete using Superpave technology // *Bulletin of the Belgorod State Technological University*. V.G. Shukhov. - 2019. - No. 3. - P. 8-14. - [https://doi.org/10.34031/article\\_5ca1f62f6b9a09.67742444](https://doi.org/10.34031/article_5ca1f62f6b9a09.67742444).
26. Singh, D., & Girimath, S. (2016). Investigation of rheological properties and Superpave PG of PMB mixed with reclaimed asphalt pavement binders. *Construction and Building Materials*, 126, 834–842. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.09.084>.
27. Rys, D., Jaczewski, M., Pszczola, M., Jaskula, P., & Bankowski, W. (2020). Effect of bitumen characteristics obtained according to EN and Superpave specifications on asphalt mixture performance in low-temperature laboratory tests. *Construction and Building Materials*, 231, 117156. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.117156>.

Fomin, A.; Khomyakov, A.

Asphalt concrete based on bituminous polysulfide binder, designed according to the volumetric method; 2022; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **105** Article No 10512. doi: 10.4123/CUBS.105.12



28. Ezzat E.N., Abed A.H. Enhancement rheological properties of asphalt binder modified with hybrid polymers according to superpave system // Mater. TodayProc. Elsevier Ltd., 2019. Vol. 20. P. 572–578. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.191>.
29. Fomin, Alexey Yurievich. Bitumen polysulfide binders for road asphalt concrete: Abstract of the thesis. ... candidate of technical sciences: 05.23.05 / Kazan. State. architect.-builds. acad. - Kazan, 2004. - 23 p. URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01002665089?page=1&rotate=0&theme=white>
30. GOST 9128-2013 «Asphaltic concrete and polimer asphaltic concrete mixtures, asphaltic concrete and polimer asphaltic concrete for roads and aerodromes. Specifications». URL: <https://www.mos.ru/upload/documents/files/6414/GOST9128-2013.pdf>
31. Gayfutdinov, R. F. Research of abrasive wear of crushed stone for highways / R. F. Gayfutdinov, E. R. Khafizov // Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. - 2020. - No. 1 (51). - S. 128-137. [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_43880522\\_42131936.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_43880522_42131936.pdf).
32. Gayfutdinov, R. Pavement wear process and abrasive wear resistance of asphalt concrete / R. Gayfutdinov, G. Bajmukhametov, E. Hafizov // E3S Web of Conferences Volume 274 (2021) : 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE - 2021), Kazan, April 21–28, 2021. Vol. 274. - France: EDP Sciences, 2021. - P. 2008. – <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127402008>.
33. Gayfutdinov, R. F. Approbation of existing methods for assessing the wear resistance of crushed stone on the example of stone materials used in the Republic of Tatarstan / R. F. Gayfutdinov, E. R. Khafizov // Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. - 2019. - No. 4 (50). - S. 427-434. [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_41580947\\_29759957.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_41580947_29759957.pdf)
34. GOST 11506-73 «Petroleum asphalt. Method for determination of softening point by ring and ball». URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/780/4294852826.pdf>
35. GOST 33143-2014 «Automobile roads of general use. Viscous road petroleum bitumens. Method for determination of Fraas brittleness temperature». URL: <https://www.mos.ru/upload/documents/files/795/GOST33133-2014.pdf>
36. GOST 33141-2014 «Automobile roads of general use. Viscous road petroleum bitumens. Determination of flash points. Cleveland open cup method». URL: <https://matest.ru/uploads/russian-standards/GOST33141.pdf>
37. GOST R 58400.1-2019 «Automobile roads of general use. Petroleum-based bitumen binder. Specifications based on operational temperature range». URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293729/4293729349.pdf>
38. GOST 33137-2014 «Automobile roads of general use. Viscous road petroleum bitumens. Method for determination of dynamic viscosity by rotational viscometer». URL: <https://matest.ru/uploads/russian-standards/GOST33137.pdf>
39. GOST R 58400.10-2019 «Automobile roads of general use. Petroleum-based bitumen binders. Method for determination of the properties using a dynamic shear rheometer (DSR)». URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293729/4293729345.pdf>
40. GOST 33140-2014 «Automobile roads of general use. Viscous road petroleum bitumens. Method for determining the aging under high temperature and air (method RTFOT)». URL: <https://matest.ru/uploads/russian-standards/GOST33140.pdf>
41. GOST R 58400.5-2019 «Automobile roads of general use. Petroleum based bitumen binders. Method of aging under the action of pressure and temperature (PAV)». URL: <https://matest.ru/uploads/russian-standards/GOSTR58400.5-19.pdf>
42. GOST R 58400.9-2019 «Automobile roads of general use. Petroleum-based bitumen binders. Method for determination of tow temperature properties using dynamic shear rheometer (DSR)». URL: <https://matest.ru/uploads/russian-standards/GOSTR58400.9-19.pdf>
43. Trautvain A.I., Akimov A.E., Denisov V.P., Lashin M.V. Features of the method of volumetric design of asphalt concrete using Superpave technology // Bulletin of the Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. - 2019. - No. 3. - P. 8-14. – [https://doi.org/10.34031/article\\_5ca1f62f6b9a09.67742444](https://doi.org/10.34031/article_5ca1f62f6b9a09.67742444).
44. GOST R 58401.1-2019 «Automobile roads of general use. Asphalt mixtures and asphalt concrete for road pavement. Volumetric-functional design system. Technical requirements». URL: <https://www.mos.ru/upload/documents/files/7764/GOSTR584011-2019.pdf>
45. GOST R 58401.13-2019 «Automobile roads of general use. Asphalt mixtures and asphalt concrete for road pavement. Method for preparation of specimens using gyratory compactor». URL: <https://matest.ru/uploads/russian-standards/GOSTR58401.13-19.pdf>

Fomin, A.; Khomyakov, A.

Asphalt concrete based on bituminous polysulfide binder, designed according to the volumetric method; 2022; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **105** Article No 10512. doi: 10.4123/CUBS.105.12



46. GOST R 58406.3-2020 «Automobile roads of general use. Asphalt mixtures and asphalt. Method for determining the resistance to rutting by rolling a loaded wheel». URL: <https://matest.ru/uploads/russian-standards/GOSTR58406.3-20.pdf>