

УДК: 691.1

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/71.10

EDN: LPZQEN



Структура и свойства битумполисульфидных вяжущих нового состава

А.А. Хомяков^{1,2}, А.Ю. Фомин³, Е.С. Студенцов⁴

¹ООО «УПТК», г. Казань, Российская Федерация

²ООО «Совтехпро», г. Казань, Российская Федерация

³Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

⁴ОАО «Алексеевскдорстрой», Республика Татарстан, пгт. Алексеевское, Российская
Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Органические полисульфиды являются перспективными в качестве модификаторов нефтяных дорожных битумов. Их введение в битум позволяет получить вяжущие с высокой эластичностью и температурой размягчения, низкой температурой хрупкости и широким температурным диапазоном применения. При этом, полисульфиды обладают сравнительно небольшой молекулярной массой (300-600 М_г) и для проявления значимого эффекта модификации, требуется сравнительно большая их дозировка в состав вяжущего (до 40 масс.%), что увеличивает экономические затраты на производство полисульфидов и битумполисульфидных вяжущих на их основе. Кроме того, процесс сополимеризации серы с органическими продуктами достаточно длителен (3-4 часа), что увеличивает время производственного цикла и требует больших энергозатрат. Для оптимизации состава, сокращения времени синтеза и с целью обеспечения эффекта модификации битумов малыми дозировками полисульфидов (до 5 масс.%), разработаны полисульфиды новых составов, состоящих из серы, смеси высших жирных кислот и полиэтиленполиамины, с введением в реакционную массу катализатора – хлористого кальция. *Задачами работы являются:* подбор компонентов состава органического полисульфида; синтез органического полисульфида; введение полисульфида в нефтяной дорожный битум с получением битумполисульфидных вяжущих и исследованием их свойств и структуры.

Результаты. Введение органического полисульфида нового состава в битум способствует увеличению температуры размягчения вяжущего, снижению температуры хрупкости и пенетрации, увеличению адгезионных свойств к материалам минерального заполнителя асфальтобетонной смеси. Применение катализатора позволяет сократить время синтеза полисульфидов в 2 раза. Битумполисульфидные вяжущие представляют собой гетерогенные многофазные двухфазные системы. Их микроструктура содержит кристаллические новообразования дендритной формы.

Выводы. В период экспозиции отвержденных вяжущих до 7 суток наблюдается кинетическое увеличение температуры размягчения и снижение пенетрации, что, вероятно, связано с процессом кристаллизации и перекристаллизации органических полисульфидов. Полученные результаты позволяют предположить, что дорожные асфальтобетоны на битумполисульфидных вяжущих будут обладать стойкостью к пластическим и низкотемпературным деформациям.

Ключевые слова: сера, битум, адгезия, модификация, органический полисульфид, битумполисульфидные вяжущие, асфальтобетон

Для цитирования: Хомяков А.А., Фомин А.Ю., Студенцов Е.С. Структура и свойства битумполисульфидных вяжущих нового состава // Известия КГАСУ, 2025, № 1(71), с. 112-121, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/71.10, EDN: LPZQEN

Structure and properties of bitumen polysulfide binders of new composition

A.A. Khomyakov^{1,2}, A.Y. Fomin³, E.S. Studentsov⁴

¹LLC «UPTK», Kazan, Russian Federation

²LLC «Sovtehprom», Kazan, Russian Federation

³Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

⁴JSC «Alekseevskdorstroy», Republic of Tatarstan, Alekseevskoye, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* Organic polysulfides are promising as modifiers of petroleum road bitumen. Their introduction into bitumen allows obtaining binders with high elasticity and softening temperature, low brittleness temperature and wide temperature range of application. At the same time, polysulfides have a relatively small molecular weight (300-600 M_r) and to show a significant modification effect a relatively large dose of them in the binder composition is required (up to 40 wt.%), which increases the economic costs of producing polysulfides and bitumen-polysulfide binders based on them. In addition, the process of copolymerization of sulfur with organic products is quite long (3-4 hours), which increases the time of the production cycle and requires high energy costs. In order to optimize the composition, reduce the synthesis time and ensure the effect of bitumen modification with small doses of polysulfides (up to 5 wt.%), polysulfides of new compositions have been developed, consisting of sulfur, a mixture of higher fatty acids and polyethylene polyamine, with the introduction of a catalyst - calcium chloride - into the reaction mass. The objectives of the work are: the selection of components of the organic polysulfide composition; synthesis of organic polysulfide; introduction of polysulfide into petroleum road bitumen with the production of bitumen-polysulfide binders and study of their properties and structure.

Results. The introduction of organic polysulfide of a new composition into bitumen helps to increase the binder softening temperature, reduce the brittleness and penetration temperature, and increase the adhesive properties to the materials of the mineral filler of the asphalt concrete mixture. The use of a catalyst allows reducing the time of polysulfide synthesis by 2 times. Bitumen-polysulfide binders are heterogeneous multiphase systems. Their microstructure contains crystalline neoplasms of a dendritic form.

Conclusions. During the exposure period of hardened binders up to 7 days, a kinetic increase in the softening temperature and a decrease in penetration are observed, which is probably associated with the process of crystallization and recrystallization of organic polysulfide. The results obtained suggest that road asphalt concretes based on bitumen-polysulfide binders will have resistance to plastic and low-temperature deformations.

Keywords: sulfur, bitumen, adhesion, modification, organic polysulfide, bitumen-polysulfide binders, asphalt concrete

For citation: Khomyakov A.A., Fomin A.Y., Studentsov E.S. Structure and properties of bitumen polysulfide binders of new composition // News of KSUAE, 2025, № 1(71), p. 112-121, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/71.10, EDN: LPZQEN

1. Введение

В современных условиях высоких транспортных нагрузок широко применяются асфальтобетоны, запроектированные по объемно-функциональному методу. Они обладают повышенной устойчивостью к пластическим деформациям, имеют ряд преимуществ перед традиционными асфальтобетонами. Ввиду высокой наполненности смеси заполнителем и определенной жесткости, они требуют соблюдения определенной культуры производства и укладки, что также связано с реологическими свойствами применяемых вяжущих, классифицируемых по маркам PG (Performance Grade).

Как правило, в составе PG вяжущих применяют полимерные модификаторы, поскольку известно, что полимерно-битумные вяжущие (ПБВ) обладают высокими физико-механическими характеристиками [1]. Например, в сравнении с чистыми

битумами, для ПБВ характерны большие тепло- и низкотемпературные свойства [2-3], а также эластичность, деформативность и трещиностойкость [4-6].

Однако, с введением полимеров в битум вязкость вяжущего увеличивается, что влияет на качество формирования пленки вяжущего на поверхности минерального заполнителя одинаковой толщины, повышает термическую чувствительность смеси к относительно низким температурам окружающего воздуха, повышает вероятность недоуплотнения асфальтобетонной смеси при нарушении дальности перевозки, несоблюдения ритмичности укладки смеси, простоя автотранспорта.

В качестве альтернативы полимерно-битумным вяжущим могут выступать материалы на основе битума и серы – серобитумы и сероасфальтобетоны.

Сера позволяет повысить температуру размягчения битума, снизить его пенетрацию и растяжимость, а также температуру хрупкости. Введение серы формирует в серобитумном вяжущем вторичную дисперсную структуру, тип которой зависит от массового содержания серы. В небольших количествах (до 15-20 масс.%) сера пластифицирует битум и способствует образованию высокодисперсной коагуляционной системы в серобитумном вяжущем. Но данный эффект временный, и при увеличении содержания серы в составе битума образуется кристаллизационная структура, которая снижает пластичность битума и увеличивает его жесткость и хрупкость [7-8]. Также сера оказывает положительное влияние на вязкость серобитумного вяжущего [9], но в то же время, в чистом виде введение серы ухудшает адгезионные свойства битума.

Сероасфальтобетон, в свою очередь, обладает повышенными стойкостью к динамическим воздействиям, водостойкостью, пределом прочности при сжатии и при расколе, сопротивлением пластическому течению [10-12], а также стойкостью к колееобразованию, повышенной коррозионной стойкостью и усталостной прочностью в сравнении с обычным асфальтобетоном [13-15].

При всех очевидных плюсах сероасфальтобетона, он обладает одним главным минусом – несовершенством санитарно-гигиенического процесса, которое выражается в эмиссии токсичных газов (преимущественно сероводорода и диоксида серы) при производстве и укладке сероасфальтобетонной смеси.

Решение данной проблемы возможно путем применения органических полисульфидов (ОПС). В отличие от кристаллической серы, полисульфиды являются эластомерами, но при этом сохраняются термопластические свойства, тем самым их растворимость в битуме, в отличие от высокомолекулярных полимеров, происходит значительно быстрее с образованием гомогенных систем. Поэтому разработка битумполисульфидных вяжущих (БПВ) на основе органических полисульфидов нового состава является перспективной и актуальной задачей.

При производстве битумполисульфидных вяжущих выделение сероводорода наблюдается в значительно меньших объемах ввиду того, что полисульфидные цепи химически более инертны в сравнении с чистой серой [16].

Известны примеры сополимеризации высших жирных кислот (ВЖК) с аминами в синтезе высокомолекулярных полимеров [17-18], и мы полагаем, что сополимеризация серы с полиэтиленполиамином и высшими жирными кислотами позволит получить полисульфид с большей молекулярной массой.

Кроме того известно, что для разрыва межатомных связей в молекуле серы S_8 , с образованием активных радикалов серы, при синтезе серосодержащих соединений широко применяются вещества из разряда кислот Льюиса, например хлорид алюминия ($AlCl_3$) [19], или кальциевой соли соляной кислоты ($CaCl_2$). Поскольку $AlCl_3$ достаточно токсичен, в нашей работе мы применили $CaCl_2$.

Целью работы является оптимизация состава органического полисульфида для обеспечения эффекта модификации нефтяных дорожных битумов при малых дозировках (до 5 масс.%).

Задачами работы являются: подбор компонентов состава органического полисульфида; синтез органического полисульфида; введение полисульфида в нефтяной битум с последующим получением битумполисульфидных вяжущих и исследованием их свойств и структуры.

2. Материалы и методы

При проведении исследований применялся нефтяной дорожный битум марки БНД 70/100, техническая сера, смесь высших жирных кислот (ВЖК), хлористый кальций безводный (CaCl_2) и полиэтиленполиамины.

Синтез органического полисульфида производился путем равномерного перемешивания исходных компонентов в химическом реакторе при температуре 140°C.

По окончании синтеза полисульфид охлаждали до комнатной температуры. Материал представляет собой каучукоподобную массу, которая при нагревании до температуры 120-140°C переходит в пластичное состояние. Перед введением органического полисульфида в битум, его предварительно измельчали в частицы размером до 5 мм.

Структура битумполисульфидных вяжущих исследовалась методом оптической микроскопии (рис. 1) с помощью микроскопа Zeiss Axio Imager A2.

Оптическая микроскопия проводилась по методу «светлого поля в проходящем свете». Данный метод применяется при исследовании веществ, у которых различные участки структуры по-разному поглощают свет.

Органический полисульфид вводился в расплав битума в количестве 5-40 масс.% и перемешивался до его полного растворения. Таким образом получали битумполисульфидное вяжущее (БПВ), и исследовали его свойства: температуру размягчения¹, температуру хрупкости², глубину проникания иглы³ и растяжимость⁴, а также адгезию⁵ к различным минеральным породам.

Испытания по определению адгезионных свойств проводили через два часа после обработки зерен минеральных материалов битумными вяжущими. Лабораторный стакан заполняли на 2/3 объема дистиллированной водой, устанавливали на электроплитку и доводили воду до кипения. Зерна минеральных материалов подвешивали на штативе и поочередно опускали в середину лабораторного стакана так, чтобы они не касались дна, стенок стакана и друг друга. В таком положении зерна минеральных материалов выдерживали в течение 30±1 минут. Битумное вяжущее, отделившееся от поверхности щебня в процессе кипячения и всплывшее на поверхность воды, удаляли фильтровальной бумагой. По прошествии 30 минут, зерна минеральных материалов вынимали из лабораторного стакана и помещали в стакан с холодной водой на 2±1 минуты с целью охлаждения и закрепления оставшейся пленки битумного вяжущего на поверхности минеральных материалов. Остывшие зерна щебня вынимали из стакана, помещали на фильтровальную бумагу, а далее на металлический поддон, и визуально фиксировали адгезионные свойства.

3. Результаты и обсуждение

Для проведения исследований были подобраны экспериментальные составы битумполисульфидных вяжущих. Им были присвоены марки и численные индексы, соответствующие содержанию в вяжущем органического полисульфида: БПВ-5, БПВ-10, БПВ-25 и БПВ-40 соответственно. При этом БПВ-10, 25 и 40 включают в своем составе полисульфид на основе серы и смеси ВЖК. А вяжущее БПВ-5 содержит полисульфид нового состава, на основе смеси ВЖК, серы и полиэтиленполиамины.

Научный и практический интерес представляло экспериментальное подтверждение модифицирующего эффекта полисульфида нового состава в битуме при его относительно малых дозировках (до 5 масс. %). Характеристики концентрационных и кинетических зависимостей БПВ, содержащих полисульфиды на основе смеси ВЖК и серы изложены в научных работах Фомина А.Ю., Хозина В.Г., [16, 20-21] поэтому в данной работе, при

¹ ГОСТ 33142-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Метод определения температуры размягчения. Метод Кольцо и Шар / Стандартиформ, 01.10.2015 – 12 с.

² ГОСТ 33143-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Метод определения температуры хрупкости по Фраасу / Стандартиформ, 01.10.2015 – 12 с.

³ ГОСТ 33136-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Метод определения глубины проникания иглы / Стандартиформ, 01.12.2015 – 11 с.

⁴ ГОСТ 33138-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Метод определения растяжимости / Стандартиформ, 01.10.2015 – 8 с.

⁵ ГОСТ Р 58406.2-2020. Дороги автомобильные общего пользования. Смеси горячие асфальтобетонные и асфальтобетон. Технические условия / Российский институт стандартизации, 15.05.2020 – 28 с.

анализе свойств БПВ нового состава, вяжущие БПВ 10, 25 и 40 рассматривались в качестве наиболее близкого прототипа. Результаты испытаний представлены в таблицах 1-5.

Таблица 1

Кинетическая зависимость температуры размягчения БПВ нового состава

Наименование битума	Температура размягчения, 1-е сутки	Температура размягчения, 3-е сутки	Температура размягчения, 5-е сутки	Температура размягчения, 7-е сутки
БПВ-5	49,9°C	51,0°C	51,4°C	52,2°C
БПВ-10	44,5°C	51,4°C	52,0°C	52,8°C
БПВ-25	44,0°C	53,0°C	53,2°C	54,2°C
БПВ-40	50,0°C	54,4°C	57,7°C	60,4°C
Чистый битум БНД 70/100	48°C			

Таблица 2

Результаты определения температуры хрупкости БПВ нового состава

Наименование показателя	БНД 70/100	БПВ-5	БПВ-10	БПВ-25	БПВ-40
Температура хрупкости, °C, не выше	-18	-21	-18	-22	-25

Таблица 3

Результаты определения глубины проникания иглы БПВ нового состава при 25°C

Наименование битума	Глубина проникания иглы при 25°C, 0,1 мм, 1 сутки	Глубина проникания иглы при 25°C, 0,1 мм, 3 сутки	Глубина проникания иглы при 25°C, 0,1 мм, 5 сутки	Глубина проникания иглы при 25°C, 0,1 мм, 7 сутки
БПВ-5	58	55	51	47
БПВ-10	52	50	49	48
БПВ-25	98	48	46	44
БПВ-40	110	81	69	58
Чистый битум БНД 70/100	76°C			

Таблица 4

Результаты определения глубины проникания иглы БПВ нового состава при 0°C

Наименование битума	Глубина проникания иглы при 0°C, 0,1 мм, 1 сутки	Глубина проникания иглы при 0°C, 0,1 мм, 3 сутки	Глубина проникания иглы при 0°C, 0,1 мм, 5 сутки	Глубина проникания иглы при 0°C, 0,1 мм, 7 сутки
БПВ-5	25	23	21	18
БПВ-10	16	18	16	15
БПВ-25	23	25	24	24
БПВ-40	15	22	22	18
Чистый битум БНД 70/100	25°C			

Таблица 5

Результаты испытания растяжимости БПВ нового состава

Наименование показателя	БНД 70/100	БПВ-5	БПВ-10	БПВ-25	БПВ-40
Растяжимость при 0°C, см, не менее	3,9	4,0	1,2	Разорвался	Разорвался
Растяжимость при 25°C, см, не менее	65	11,5	41,2	32,3	90,1

Результаты испытаний БПВ, представленные в таблицах, показали, что все составы проявляют кинетическое изменение физико-механических свойств в период экспозиции 1...7 суток. Так, введение 25 и 40 масс.% полисульфида на основе смеси ВЖК и серы, в течение первых суток способствует пластификации вяжущего, что выражается в снижении температур их размягчения на 3,5-4°C, в сравнении с аналогичным показателем исходного битума (таблица 1). Далее наблюдается кинетический рост показателя до достижения значений 52,8...54,2°C. Введение же 40 масс.% полисульфида в битум с первых суток экспозиции способствует монотонному росту температуры размягчения вяжущего, минуя временной интервал пластификации, что, вероятно, обусловлено большим влиянием полисульфида на свойства вяжущего при его относительно высокой концентрации, поскольку температура размягчения самих полисульфидов достаточно высока и варьируется в пределах 100-115°C [15].

Заметное влияние полисульфидов на изменение реологических свойств вяжущих наблюдается при больших концентрациях ОПС в составе БПВ. Так, введение 25 и 40 масс.% ОПС в битум способствует увеличению показателя пенетрации вяжущего при 25°C, в 1-е сутки: с 76 до 98 и 110 мм 0,1 соответственно (таблица 3). Далее наблюдается кинетический набор вязкости и жесткости вяжущих, и в возрасте 7 суток пенетрация вяжущих БПВ-25 и 40 достигает значений 44 и 58 мм 0,1 соответственно.

Значения пенетрации при 0°C вяжущих БПВ-10, 25 и 40 не имеют характерных концентрационных зависимостей и лежат в пределах 15...25 мм 0,1 (таблица 4).

Наименьшей температурой хрупкости (таблица 2) обладает вяжущее БПВ-40, равной -25°C, что обусловлено проявлением вяжущим свойств эластомера при высокой дозировке полисульфида.

Сравнительный анализ показателей свойств вяжущего нового состава БПВ-5, показал, что по абсолютным значениям физико-механических свойств оно сравнимо со свойствами известных вяжущих БПВ-10 и 25 и превышает свойства исходного битума.

Так, значения температур размягчения и хрупкости БПВ-5, в возрасте 7 суток, составляет 52,2°C и -21°C соответственно, в сравнении с исходным битумом – 48°C и -18°C, что говорит о температурном расширении работоспособности вяжущего.

Методом оптической микроскопии (рис. 1) установлено, что БПВ имеют двухфазную гетерогенную структуру. Наблюдаемая в среде битума фаза представляет собой новообразования дендритной формы и является полисульфидом, распределенном в объеме битума. Возможно, дендритная форма фазы обусловлена частичной кристаллизацией аморфных полисульфидов в процессе охлаждения и твердения битумполисульфидных вяжущих, что требует дополнительных исследований. Количественное изменение показателей физико-механических характеристик БПВ в сторону их увеличения также, вероятно, связано с кристаллизацией полисульфидов и увеличением жесткости вяжущего. аморфно-кристаллическую структуру. кристаллических наращивание объема кристаллической

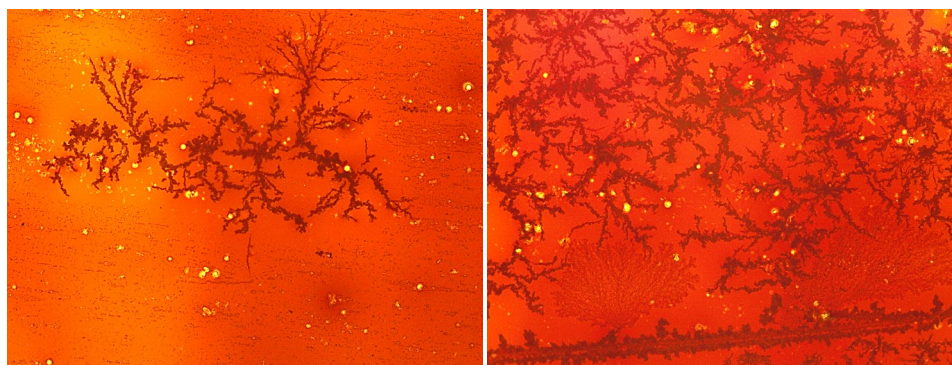


Рис. 1. Оптическая фотография битумполисульфидного вяжущего на 1-е сутки (слева) и 3-и сутки (справа), увеличение 10х (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Optical photograph of bitumen polysulfide binder on the 1st day (on the left) and 3rd day (on the right), 10x increase (illustration by the authors)

Адгезионные свойства БПВ-5 оцениваются в 5 баллов к различным минеральным породам: габбро, порфирит, мрамор и гравий. Сравнительные результаты испытаний представлены на рисунках 2 и 3.

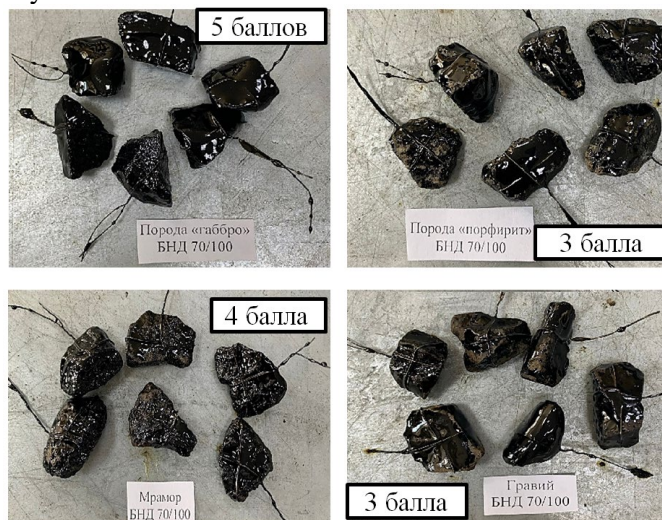


Рис. 2. Адгезионные свойства битума марки БНД 70/100 к различным минеральным породам (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Adhesive properties of BND grade bitumen 70/100 to various mineral rocks (illustration by the authors)

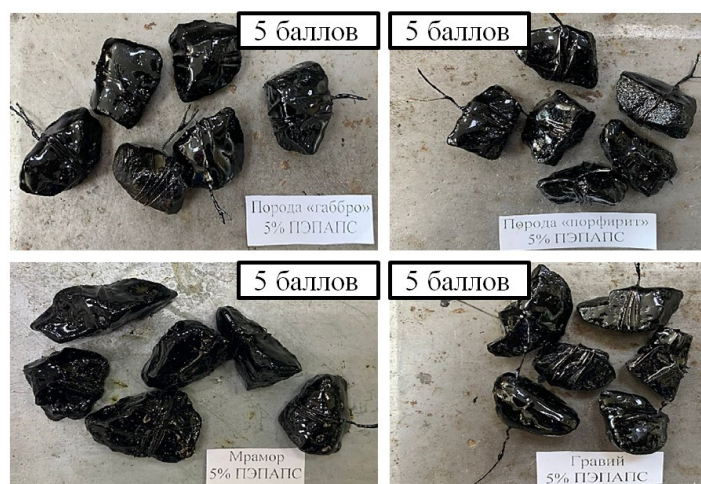


Рис. 3. Адгезионные свойства битумполисульфидного вяжущего БПВ-5 к различным минеральным породам (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Adhesive properties of bitumen polysulfide binder BPV-5 to various mineral rocks (illustration by the authors)

Битумполисульфидное вяжущее нового состава БПВ-5 обладает высоким показателем адгезии к различным минеральным материалам (габбро, порфирит, мрамор, гравий), равным 5 баллам. Для сравнения, исходный битум обладает высокой адгезией только к породе «габбро» (5 баллов), в остальных случаях показатель сравнительно низкий и соответствует 3-м баллам для породы «порфирит» и гравия, и 4-м баллам для мрамора.

4. Заключение

1. Путем термической сополимеризации серы, полиэтиленполиамин и смеси высших жирных получены органические полисульфиды нового состава. Введение в реакцию смесь катализатора – хлористого кальция, позволяет сократить время синтеза полисульфидов в 2 раза – до 1,5 часов.

2. Битумполисульфидное вяжущее БПВ-5, полученное на основе полисульфида нового состава, обладает значениями температуры размягчения и хрупкости, сравнимыми

с аналогичными показателями известных вяжущих БПВ-10 и БПВ-25. Численное значение температуры размягчения БПВ-5 составляет 52,2°C, температуры хрупкости - 21°C. Показатель адгезии вяжущих к минеральным породам габбро, порфирит, гравий и мрамор составляет 5 баллов, в то время как исходный битум обладает высокой адгезией только к породе «габбро» (5 баллов), в остальных случаях показатель сравнительно низкий и соответствует 3-м баллам для породы «порфирит» и гравия, и 4-м баллам для мрамора.

3. Методом оптической микроскопии установлено, что битумполисульфидные вяжущие имеют двухфазную гетерогенную структуру. Визуально установлено кинетическое видоизменение формы и увеличение объема кристаллической фазы в среде битума. Проявление структурирующих свойств полисульфидов способствует количественному повышению показателей физико-механических свойств битумполисульфидных вяжущих в сравнении с исходным битумом.

Список литературы / References

1. Печеный Б.Г. Битумы и битумные композиции. М.: Химия, 1990. 256 с.
Pecheny B.G. Bitumen and bitumen compositions. Moscow: Chemistry, 1990. 256 p.
2. Степанович Ю. А. Влияние добавок полиэтилена на структуру и свойства СБС-модифицированных битумов // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. 2022. № 2(259). С. 49-55. DOI: 10.52065/2520-2669-2022-259-2-49-55.
Stepanovich Yu. A. Effect of polyethylene additives on the structure and properties of SBS-modified bitumens // Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical technologies, biotechnology, geoecology. 2022. No. 2 (259). P. 49-55. DOI: 10.52065/2520-2669-2022-259-2-49-55.
3. Malinowski S., Woszek A., Franus W. Modern two-component modifiers inhibiting the aging process of road bitumen // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 409. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133838>.
4. Schaur A., Unterberger S.H., Lackner R. Impact of molecular structure of PP on thermo-rheological properties of polymer-modified bitumen // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 287. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122981>.
5. Xu J., Xia T., Yin B., Yang M. Effect of MDI on the structure and properties of SBS modified bitumen // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 250. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118911>.
6. Xie S., Yi J., Zhou T., Fini H.E., Feng D. Phase transition process of sulfur in bitumen and its effect on rheological properties of bitumen // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 364. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129914>.
7. Галдина В. Д. Физико-химические и реологические свойства серобитумных вяжущих: сб. материалов Международной научно-практической конференции (к 85-летию ФГБОУ ВПО "СибАДИ") «Архитектура, строительство, транспорт»: / ФГБОУ ВПО «Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)». Омск, 2015. С. 482-489.
Galdina V. D. Physicochemical and rheological properties of sulfur-bitumen binders: collection of materials of the International scientific and practical conference (for the 85th anniversary of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "SibADI") "Architecture, construction, transport": / Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Siberian State Automobile and Highway Academy (SibADI)". Omsk, 2015. P. 482-489.
8. Росилов М. С. Изучение физико-химических свойств серобитума // Universum: технические науки. 2024. № 3-6(120). С. 27-29.
Rosilov M. S. Study of physicochemical properties of sulfur bitumen // Universum: technical sciences. 2024. No. 3-6 (120). P. 27-29.
9. Гладких В. А. Исследование вязкости серобитумных вяжущих // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 11. С. 72-76.
Gladkikh V. A. Study of viscosity of sulfur-bitumen binders // Industrial and civil engineering. 2017. No. 11. P. 72-76.

10. Nurmukhanov A. Physico-chemical and mechanical properties of sulfur asphalt concrete // Интернаука. 2024. No. 2-3(319). P. 51-52.
Nurmukhanov A. Physico-chemical and mechanical properties of sulfur asphalt concrete // Интернаука. 2024. No. 2-3(319). P. 51-52.
11. Ле Хыу Т. Физико-механические свойства серобитумных вяжущих и сероасфальтобетонов // Инженерный вестник Дона. 2022. № 6(90). С. 646-664.
Le Huu T. Physical and mechanical properties of sulfur-bitumen binders and sulfur-asphalt concrete // Engineering Bulletin of the Don. 2022. No. 6(90). P. 646-664.
12. Тахавиев Р. Н. Сероасфальтобетон: преимущества, недостатки и экономическая эффективность: сб. научных статей по материалам XIII Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы современной науки и практики» / Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр "Вестник науки». Уфа, 2023. С. 131-137.
Takhaviev R. N. Sulfur asphalt concrete: advantages, disadvantages and economic efficiency: collection of scientific articles on the materials of the XIII International Scientific and Practical Conference "Current Issues of Modern Science and Practice" / LLC Scientific Publishing Center "Bulletin of Science". Ufa, 2023. P. 131-137
13. Ле Х. Т. Стойкость аппретированных сероасфальтобетонов каучуком к образованию колеи // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2022. Т. 18, № 4(30). С. 49-59. DOI: 10.34708/GSTOU.2022.57.60.006.
Le H. T. Resistance of sulfur asphalt concretes coated with rubber to rutting // Bulletin of GGNTU. Technical sciences. 2022. Vol. 18, No. 4(30). P. 49-59. DOI: 10.34708/GSTOU.2022.57.60.006.
14. Васильев Ю. Э. Исследование коррозионной устойчивости сероасфальтобетона // Интернет-журнал Науковедение. 2014. № 5(24). С. 22.
Vasiliev Yu. E. Study of corrosion resistance of sulfur asphalt concrete // Internet journal Naukovedenie. 2014. No. 5(24). P. 22.
15. Василовская Г. В., Назиров Д. Р. Сероасфальтобетон // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2011. №6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/seroasfaltobeton> (дата обращения: 10.02.2025).
Vasilovskaya G. V., Nazirov D. R. Sulfur asphalt concrete // Journal SFU. Techniques and technologies. 2011. No. 6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/seroasfaltobeton> (reference date: 10.02.2025).
16. Порфирьева Р. Т. Экологическая технология битумполисульфидных вяжущих / Р. Т. Порфирьева, В. Г. Хозин, А. Ю. Фомин // Вестник Казанского технологического университета. 2004. № 1. С. 375-376.
Porfiryeva, R. T. Ecological technology of bitumen polysulfide binders / R. T. Porfiryeva, V. G. Khozin, A. Yu. Fomin // Bulletin of the Kazan Technological University. - 2004. - No. 1. - P. 375-376.
17. Асадов З.Г., Асадова А.З., Рагимов Р.А., Поладова Т.А., Ахмедбекова С.Ф. Синтез и свойства новых нефтесобирающих и диспергирующих полимерных реагентов на основе акриловой кислоты, α -олефинов и аминов // Журнал прикладной химии. 2015. Т. 88, № 1. С. 164-171.
Asadov Z.G., Asadova A.Z., Ragimov R.A., Poladova T.A., Akhmedbekova S.F. Synthesis and properties of new oil-collecting and dispersing polymeric reagents based on acrylic acid, α -olefins and amines // Journal of Applied Chemistry. 2015. Vol. 88, No. 1. P. 164-171.
18. Способ получения адгезионной добавки для дорожного битума: пат. № RU 2723843 C1 Российская Федерация, № 2019142769, заявл. 20.12.2019: опубл. 17.06.2020, Бюл. №17, 9 с.
Method for producing an adhesive additive for road bitumen: patent No. RU 2723843 C1 Russian Federation, No. 2019142769, declared 20.12.2019: published 17.06.2020, Bulletin No. 17, 9 p.
19. Медведева Г.А., Порфирьева Р.Т., Герасимов В.В., Ефимова В.А. Технология и свойства полисульфидного материала, модифицированного

- органометаллофосфатными соединениями // Вестник Казанского технологического университета. 2009. № 3. С. 18-22.
Medvedeva G.A., Porfiryeva R.T., Gerasimov V.V., Yefimova V.A. Technology and properties of polysulfide material modified by organometallic phosphate compounds // Bulletin of Kazan Technological University. 2009. No. 3. P. 18-22.
20. Вяжущее: пат. № 2231502 C1 Российская Федерация, № 2002126842/03: заявл. 07.10.2002: опубл. 27.06.2004, 7 с.
Binder: pat. No. 2231502 C1 Russian Federation, No. 2002126842/03: application 07.10.2002: publ. 27.06.2004, 7 p.
21. Способ получения серобитумного вяжущего: пат. № 2255066 C1 Российская Федерация, № 2004114014/03: заявл. 29.04.2004: опубл. 27.06.2005, Бюл. №18, 5 с.
Method for producing sulfur-bitumen binder: patent No. 2255066 C1 Russian Federation, No. 2004114014/03: declared 29.04.2004: published 27.06.2005, Bulletin No. 18, 5 p.

Информация об авторах

Александр Александрович Хомяков, начальник строительной лаборатории ООО «УПТК», Генеральный директор, ООО «Совтехпро», г. Казань, Российская Федерация
Email: khoma_aa@mail.ru, ORCID 0000-0002-1237-7791

Алексей Юрьевич Фомин, кандидат технических наук, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
Email: fomin-al.78@mail.ru, ORCID 0000-0002-4795-1212

Евгений Сергеевич Студенцов, начальник лаборатории ОАО «Алексеевскдорстрой», Республика Татарстан, пгт. Алексеевское, Российская Федерация
Email: labads@yandex.ru, ORCID 0009-0009-8893-6826

Information about the authors

Alexander A. Khomyakov, head of the construction laboratory LLC “UPTK”, Director, LLC “Sovtehprou”, Kazan, Russian Federation
Email: khoma_aa@mail.ru, ORCID 0000-0002-1237-7791

Alexey Y. Fomin, candidate of technical sciences, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation
Email: fomin-al.78@mail.ru, ORCID 0000-0002-4795-1212

Evgeniy S. Studentsov, head of the laboratory of JSC «Alekseevskdorstroy», Republic of Tatarstan, Alekseevskoye, Russian Federation
Email: labads@yandex.ru, ORCID 0009-0009-8893-6826