

УДК 665.775.4

Ю. А. Степанович, А. О. Шрубок

Белорусский государственный технологический университет

**ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ПОЛИЭТИЛЕНА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА
СБС-МОДИФИЦИРОВАННЫХ БИТУМОВ**

В работе в качестве модификаторов нефтяных битумов предлагается использовать полимерные смеси, содержащие стирол-бутадиен-стирольный термоэластопласт и полиэтилен высокого давления. Целью работы являлось установление оптимального соотношения компонентов комбинированного модификатора для получения стабильных полимерно-битумных вяжущих с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Объектами исследования выступали полимерно-битумные вяжущие с содержанием СБС-термоэластопласта в количестве 0–6 мас. % и полиэтилена высокого давления – 0–6 мас. %. Для вяжущих были определены эксплуатационные показатели: температура размягчения, глубина проникновения иглы, температура хрупкости, интервал пластичности. Установлено, что с увеличением доли полиэтилена в полимерной смеси наблюдается рост температуры хрупкости, снижение интервала пластичности и глубины проникновения иглы вяжущих. Показано, что для получения качественных вяжущих доля полиэтилена в смеси с сополимерами стирола и бутадиена не должна превышать 50%. Использование комбинированного модификатора приводит к снижению пенетрации на 25% и увеличению интервала пластичности вяжущих на 15% по сравнению с немодифицированным битумом. Дисперсность и равномерность распределения комбинированного модификатора в объеме битума была изучена методом люминесцентной микроскопии. Показано, что при использовании в качестве модификаторов смеси полимеров с соотношением СБС : ПЭВД, равным 2 : 1 и 5 : 1, вяжущие характеризуются удовлетворительной дисперсностью и распределением полимера в объеме битума.

Ключевые слова: нефтяной битум, полимерно-битумное вяжущее, полиэтилен высокого давления, термоэластопласт, пенетрация, интервал пластичности, люминесцентная микроскопия.

Для цитирования: Степанович Ю. А., Шрубок А. О. Влияние добавок полиэтилена высокого давления на структуру и свойства СБС-модифицированных битумов // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2022. № 2 (259). С 49–55.

Yu. A. Stepanovich, A. O. Shrubok

Belarusian State Technological University

**INFLUENCE OF POLYETHYLENE ADDITIVES ON THE STRUCTURE
AND PROPERTIES SBS-MODIFIED BITUMENS**

In this paper, polymer mixtures containing SBS-thermoplastic elastomer and low density polyethylene are offered as modifiers for petroleum bitumens. The purpose of the work was to determination the optimal ratio of the components of the combined modifier to obtain stable polymer-bitumen binders with improved performance. Polymer-bitumen binders with the content of SBS-thermoplastic elastomer 0–6% wt. and low density polyethylene 0–6% wt. were studied. Softening temperature, penetration, brittle point temperature, plasticity interval were determined. For polymer-bitumen binders an increase in the concentration of polyethylene in the polymer mixture, an increase in the brittle temperature and a decrease in the plasticity interval and a needle penetration depth. The concentration of polyethylene in a mixture with copolymers of styrene and butadiene should not exceed 50%. To obtain high-quality binders the use of a combined modifier leads to a decrease in penetration by 25% and an increase in the plasticity range by 15% compared to unmodified bitumen. Dispersion and uniformity of distribution of the combined modifier in the volume of bitumen was studied by luminescent microscopy. It has been shown that when using a mixture of polymers with a ratio of SBS : LDPE equal to 2 : 1 and 5 : 1 as modifiers polymer-modified bitumen is characterized by satisfactory dispersion and distribution of the polymer in the volume of bitumen.

Key words: petroleum bitumen, polymer-bitumen binder, petroleum polymer resins, penetration, softening temperature, thermoplastic elastomer, strength characteristics.

For citation: Stepanovich Yu. A., Shrubok A. O. Influence of polyethylene additives on the structure and properties SBS-modified bitumens. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2022, no. 2 (259), pp. 49–55 (In Russian).

Введение. Нефтяные битумы, получаемые из остатков первичной переработки нефти, благодаря хорошей адгезии к различным материалам, пластичным свойствам и влагостойкости находят широкое применение в различных областях строительства и промышленности. Большая часть от всех производимых битумов используется в дорожном строительстве в качестве вяжущих материалов. Помимо дорожного строительства, битумы и материалы на их основе могут применяться непосредственно в качестве изоляционных покрытий или как пропиточный компонент для рулонных кровельных материалов. Недостатки классических битумов связаны с их недолговечностью в условиях возрастающих нагрузок или большого перепада температур [1, 2].

Все большее распространение на рынке строительных материалов получают вяжущие на основе нефтяных битумов, модифицированных полимерными добавками. Введение в битум даже небольшого количества полимерного компонента способствует улучшению его термопластичных свойств, износостойкости при низких температурах, увеличению срока службы покрытия. Распределяясь в среде битума, полимерные компоненты образуют пространственную сетку, обеспечивающую ему эластичные свойства, которыми классические битумы не обладают [3].

Наиболее распространенными и эффективными являются полимерно-битумные вяжущие (ПБВ), модифицированные стирол-бутадиен-стирольными термоэластопластами (СБС). СБС-модифицированные битумы проявляют эластичные свойства в широком интервале температур, что позволяет увеличить срок службы дорожного покрытия в 2 раза [1]. К основным недостаткам таких полимерных модификаторов относят их высокую стоимость и необходимость применения дорогостоящих высокоэффективных перемешивающих устройств для равномерного распределения полимера в объеме битума и получения однородного и стабильного ПБВ, что в итоге приводит к удорожанию готового вяжущего. Так, добавка всего 5% СБС в нефтяной битум повышает его себестоимость в 2 раза [4]. Несмотря на высокую стоимость СБС-модифицированных материалов, значительный экономический эффект может быть достигнут за счет увеличения срока эксплуатации асфальтобетонного покрытия на их основе.

Рост объемов потребления полимерно-битумных вяжущих и областей их применения обуславливает актуальность исследований по снижению стоимости ПБВ за счет улучшения их составов, применения более дешевых полимерных модификаторов и усовершенствования тех-

нологии получения ПБВ. По своим характеристикам полимерно-битумные вяжущие должны соответствовать современной нормативно-технической документации. Поскольку требования к покрытиям постоянно ужесточаются, разрабатываются новые полимерные компоненты, используемые при модификации битумов, то требования, предъявляемые к ПБВ, также изменяются. Всего лишь пять лет назад стандарт Республики Беларусь на модифицированные дорожные битумы предусматривал выпуск исключительно СБС-модифицированных битумов, а уже в 2020 г. вступил в действие стандарт СТБ 1220, допускающий использование, помимо СБС-термоэластопластов, других полимеров (резиновой крошки, сополимеров этилена и винилацетата, полиолефинов, полимеров вторичного происхождения и др.) [5, 6].

Для получения гидроизоляционных материалов и кровельных покрытий большой интерес представляют полимерно-битумные вяжущие с добавлением полиолефиновых термопластов – полиэтилена, атактического полипропилена и т. д. [6]. Главными достоинствами полиолефинов являются их термопластичные свойства, хорошая растворимость в маслах битума и низкая себестоимость, что дает возможность рассматривать их в качестве эффективных полимерных модификаторов нефтяных битумов. Однако ввиду отсутствия в структуре полиолефинов функциональных групп, которые могли бы химически взаимодействовать с компонентами битума, перспективным направлением является использование химически модифицированных полиолефинов (окисленных, сульфированных, амидированных) или комбинирование полиолефинов с другими модификаторами полимерно-битумных вяжущих [7].

В связи с вышеизложенным представляется интерес работы, направленные на снижение себестоимости ПБВ за счет использования более дешевых полимерных модификаторов, содержащих два и более компонентов.

Основным фактором при разработке комбинированных модификаторов является совместимость полимерных компонентов между собой и с компонентами битума. В работах [8, 9] показано, что полиэтилен хорошо зарекомендовал себя в качестве компонента кровельных битумных материалов, поэтому частичная замена СБС-термоэластопласта на полиэтилен при модификации битума представляет интерес с научной и практической точек зрения.

Цель работы заключалась в установлении оптимального соотношения компонентов комбинированного модификатора на основе стирол-бутадиен-стирольного термоэластопласта (СБС) и полиэтилена высокого давления (ПЭВД)

для получения стабильных полимерно-битумных вяжущих с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Основная часть. В качестве объектов исследования были изучены полимерно-битумные вяжущие, получаемые модификацией дорожного битума марки БНД 70/100 (табл. 1), как наиболее распространенного и рекомендованного к использованию в климатических условиях Республики Беларусь. Комбинированный модификатор включал в себя два компонента: термоэластопласт СБС СН1301-1НЕ, свойства которого представлены в табл. 2, и полиэтилен высокого давления марки ПЭ 102-10К, свойства которого описаны в табл. 3.

Таблица 1
Физико-химические характеристики
исходного битума

Показатель	Значение
Глубина проникания иглы при 25°C, ×0,1 мм	95
Температура размягчения по методу кольца и шара (КиШ), °C	44
Температура хрупкости, °C	-16
Температура вспышки, °C, не ниже	200
Устойчивость к термоокислительному старению: изменение массы, г	2,5
изменение температуры размягчения после прогрева, °C	11
остаточная пенетрации, %	33,68
Индекс пенетрации	-1,27
Групповой состав, мас. %:	
асфальтены	9,8
масла	74,16
смолы	16,04

В предыдущих работах [10, 11] установлено, что количество вводимого СБС в битум не должно превышать 6% от массы готового ПБВ. В случае низких количеств полимерного модификатора в нефтяном битуме не обеспечиваются необходимые эксплуатационные характеристики вяжущего, а в случае больших количеств (более 6%) получение стабильного вяжущего затруднено и экономически нецелесообразно, так как при увеличении концентрации вводимой добавки растет себестоимость готового ПБВ. В связи с этим важной задачей является оптимизация компонентного состава ПБВ. Для решения поставленной задачи был составлен план полнофакторного эксперимента, который заключался в варьировании количества полимерных компонентов при следующих условиях: содержание СБС от 0 до 6 мас. %, ПЭВД – от 0 до 6 мас. %, интервал варьирования – 1 мас. %.

Таблица 2
Характеристика термоэластопласта
СБС СН1301-1НЕ

Показатель	Значение
Содержание стирола, мас. %	31,0
Молекулярная структура	Линейная
Зольность, мас. %	0,2
Твердость (Шор А), 5 с	68
Прочность при растяжении, МПа	14
Модуль упругости при 300%, МПа	2
Показатель текучести расплава (200°C, нагрузка 5 кг), г/10 мин	0,5

Таблица 3
Характеристика полиэтилена
высокого давления ПЭ-102-10К

Показатель	Значение
Внешний вид	Гранулы
Размер гранул, мм	2–5
Плотность, г/см ³	0,922
Показатель текучести расплава (200°C, нагрузка 5 кг), г/10 мин	0,25
Прочность при растяжении, МПа	14,7

Полимерные компоненты вводили непосредственно в битум при температуре $180 \pm 5^\circ\text{C}$ и механическом перемешивании со скоростью 1000 об/мин. Схема лабораторной установки для получения полимерно-битумных вяжущих представлена на рис. 1.

Продолжительность приготовления вяжущего определялась экспериментально на основе данных по однородности и растворению гранул полимерных компонентов.

Оценку однородности осуществляли следующим образом: через каждые 30 мин в битум погружали стеклянную палочку и визуально по его течению определяли наличие в нем комков полимеров [12].

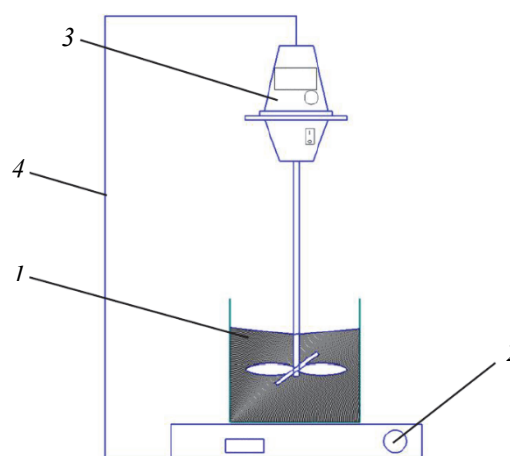


Рис. 1. Схема лабораторной установки:
1 – стакан с битумом; 2 – плитка;
3 – перемешивающее устройство; 4 – штатив

При отсутствии комков битум продолжали перемешивать еще 15 мин. Продолжительность процесса составляла от 135 до 195 мин. Для полученных полимерно-битумных вяжущих определяли температуру размягчения по кольцу и шару, пенетрацию при 25°C, температуру хрупкости по Фраасу, рассчитывали интервал пластичности.

Температуру размягчения оценивали по методу «Кольцо и Шар» в соответствии с СТБ EN 1427, погрешность измерения для немодифицированного битума составила 1,0°C, для полимермодифицированного – 1,5°C [13]. Глубину проникновения иглы (пенетрацию) вяжущих определяли на полуавтоматическом пенетрометре ПН-1 согласно СТБ EN 1426, погрешность измерения пенетрации для битума с пенетрацией до 50×0,1 мм составила 2×0,1 мм, для битума с пенетрацией свыше 50×0,1 мм – 4% от среднего значения [14]. Температуру хрупкости по Фраасу вяжущих определяли на автоматическом приборе АТХ-04 согласно СТБ EN 12593, погрешность измерения температуры хрупкости составила 3°C [15].

Экспериментальные данные, представленные в табл. 4, показывают, что снижение доли СБС-термоэластопласта в комбинированном модификаторе приводит к снижению температуры размягчения готового ПБВ на 10–20%. При этом пенетрация ПБВ снижается по сравнению с СБС-модифицированным битумом и практически не изменяется при уменьшении концентрации термоэластопласта.

Важной характеристикой для полимерно-битумных вяжущих является интервал температур, в котором битум сохраняет свою работоспособность, так называемый интервал пластичности.

Увеличение доли ПЭВД в полимерной смеси приводит к ухудшению низкотемпературных свойств ПБВ. По мере снижения концентрации СБС в полимерном модификаторе температура хрупкости ПБВ повышается на 1–5°C, а температура размягчения снижается на 9–27°C, что

свидетельствует о сужении интервала пластичности. Наиболее узким интервалом пластичности обладает битум, модифицированный комбинированным модификатором с соотношением компонентов СБС : ПЭВД – 1 : 5.

Стоит отметить, что продолжительность перемешивания ПБВ, а следовательно, и затраты на приготовление вяжущего при увеличении доли полиэтилена в битуме возрастают. При содержании ПЭВД от 0 до 50% в полимерной смеси продолжительность процесса не изменяется, а при его содержании 50% и выше временные затраты на получение ПБВ возрастают в 1,2–1,4 раза.

Таким образом, оптимальное содержание ПЭВД в смеси с СБС не должно превышать 50%. Так как полимерно-битумные вяжущие представляют собой коллоидную систему, в которой дисперсной фазой являются асфальтены и частицы полимера, распределенные в дисперсионной среде битума, важным показателем для битумных вяжущих выступает дисперсность этой системы. В процессе приготовления ПБВ необходимо получить дисперсную систему, в которой полимерный компонент будет иметь равномерное распределение в объеме битума – средний размер частиц полимера в объеме битума не должен превышать 10–100 мкм [16]. Самыми надежными методами определения распределения полимера в объеме битума являются микроскопические [17]. В этом случае обычно используется люминесцентная или флуоресцентная микроскопия, которая позволяет «подсветить» частицы полимера при увеличении в отраженном свете [18]. Для образцов полимерно-битумных вяжущих были получены микрофотографии при 10- и 40-кратном увеличении (рис. 2).

Показано, что при введении только одного полиэтиленового модификатора не удается достичь равномерного распределения модификатора, так как в случае использования ПЭВД как модификатора битума частицы слишком крупные и распределены неравномерно.

Таблица 4

Характеристика полимерно-битумных вяжущих

Показатель	Модифицированный битум							
	Б1	Б2	Б3	Б4	Б5	Б6	Б7	Б8
Номер образца	0	0	1	2	3	4	5	6
Содержание СБС, мас. %	0	6	5	4	3	2	1	0
Содержание ПЭ, мас. %	0	6	5	4	3	2	1	0
Продолжительность перемешивания, мин	180	195	195	165	135	135	135	135
Температура размягчения по КиШ, °С	51 ± 1	64 ± 1,5	63 ± 1,5	66 ± 1,5	73 ± 1,5	80 ± 1,5	82 ± 1,5	91 ± 1,5
Пенетрация при 25°C, ×0,1 мм	50 ± 2	38 ± 2	39 ± 2	35 ± 2	43 ± 2	39 ± 2	37 ± 2	45 ± 2
Температура хрупкости по Фраасу, °С	-22,7 ± 3	-15,0 ± 3	-16,0 ± 3	-18,9 ± 3	-18,9 ± 3	-19,8 ± 3	-20,8 ± 3	-19,9 ± 3
Интервал пластичности, °С	73,7	79	79	84,9	91,9	99,8	102,8	110,9

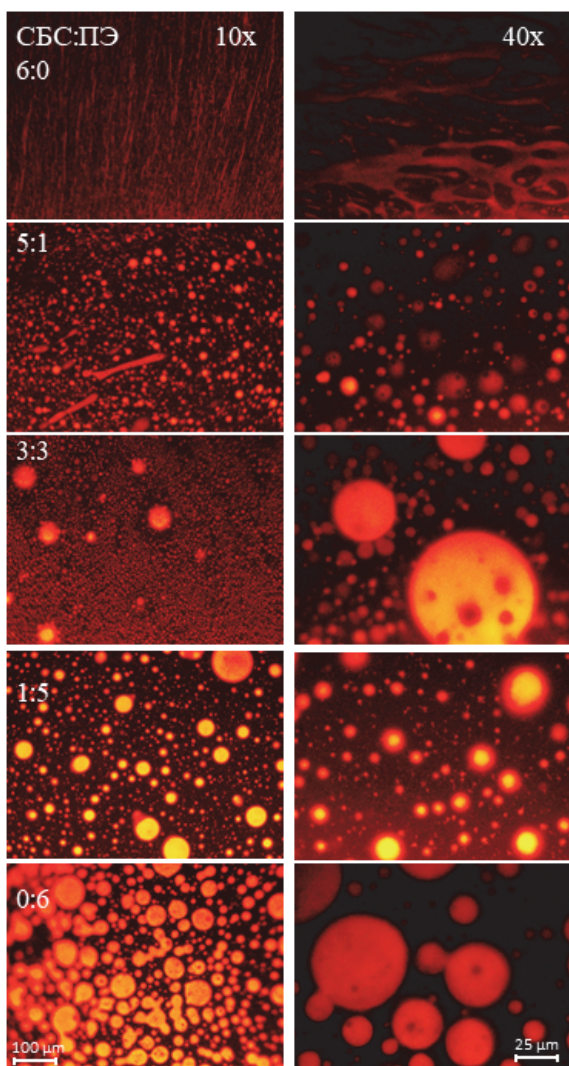


Рис. 2. Микрофотографии полученных вяжущих

При содержании ПЭВД в полимерной смеси до 50% распределение полимера в объеме битума удовлетворительно, а при содержании 50% и выше полиэтилен образует крупные агломераты, которые делают коллоидную структуру ПБВ нестабильной. При соотношении СБС : ПЭВД, равном 5 : 1, наблюдается концен-

трирование частиц сополимера стирола и бутадиена вокруг частиц полиэтилена, а само распределение этих агрегатов в объеме битума равномерно.

По мере снижения доли полиэтилена в комбинированном модификаторе и увеличения доли СБС наблюдается уменьшение среднего размера частиц, что свидетельствует о лучшей совместимости компонентов.

Заключение. Установлено что оптимальными для приготовления полимерно-битумных вяжущих являются составы комбинированного модификатора с соотношениями компонентов СБС : ПЭВД, равными 2 : 1 и 5 : 1. Введение комбинированного модификатора позволяет снизить пенетрацию полимерно-битумного вяжущего на 25% и увеличить его интервал пластичности на 15% по сравнению с немодифицированным битумом.

Несмотря на некоторое снижение интервала пластичности по сравнению с СБС-модифицированным битумом без добавки ПЭВД, данные люминесцентной микроскопии показывают хорошее распределение комбинированного модификатора в объеме битума без дополнительных временных затрат на приготовление полимерно-битумного вяжущего. Введение дополнительного количества полиэтилена приводит к нарушению стабильности системы битум – полимер, а также значительному снижению интервала работоспособности по сравнению с СБС-модифицированным битумом.

Таким образом, в работе показана возможность частичной замены СБС-термоэластопласта в составе модификаторов нефтяных битумов на полиэтилен высокого давления.

Работа выполнена в рамках государственного задания 6.6 «Разработка научно обоснованных технологических приемов регулирования структурно-механических свойств и стабильности битумных вяжущих для дорожного и коммунального строительства» ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма 8.6 «Строительные материалы, конструкции, технологии» (2021–2025 гг.).

Список литературы

1. Гуреев А. А. Нефтяные вяжущие материалы. М.: Недра, 2018. 239 с.
2. Грудников И. Б. Производство нефтяных битумов. М.: Химия, 1983. 192 с.
3. Гохман Л. М. Битумы, полимерно-битумные вяжущие, асфальтобетон, полимерасфальтобетон. М.: ЭКОН, 2008. 118 с.
4. Варенько В. А. Опыт применения модифицированных битумов и асфальтобетонов в Республике Беларусь // Вестник ХНАДУ. 2017. Вып. 79. С. 80–88.
5. Битумы модифицированные дорожные: СТБ 1220–2020. Введ. 25.02.2020. Минск: Госстандарт, 2020. 16 с.
6. Kishchynskiy S., Nagaychuk V., Bezuglyi A. Improving Quality and Durability of Bitumen and Asphalt Concrete by Modification Using Recycled Polyethylene Based Polymer Composition // Procedia Engineering. 2016. Vol. 143. P. 119–127. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.016.

7. Okhotnikova S. E., GaneevaIgor Y. M., Frolov I. N., Yusupova T. N., Fazylzyanova G. R. Structural characterization and application of bitumen modified by recycled polyethylenes // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 316. P. 126–138. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126118.

8. Hong Z. Effect of styrene-butadiene-styrene (SBS) on laboratory properties of low-density polyethylene (LDPE)/ethylene-vinyl acetate (EVA) compound modified asphalt // *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 338. P. 282–289.

9. Joohari I. B., Maniam S., Giustozzi F. Influence of compatibilizers on the storage stability of hybrid polymer-modified bitumen with recycled polyethylene // *Plastic Waste for Sustainable Asphalt Roads*, Woodhead Publishing, 2022. P. 215–232.

10. Степанович Ю. А., Шрубко А. О., Юсевич А. И. Оптимизация состава полимерно-битумных вяжущих с использованием методов планирования эксперимента // *Технология органических веществ: материалы 85-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 1–13 февр. 2021 г. Минск, 2021. С. 129–130.*

11. Шрубко А. О., Степанович Ю. А. Принципы создания стабильных полимерно-битумных композиций // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Могилев, 22–23 апр. 2021 г. Могилев, 2021. С. 269–270.*

12. Вяжущие полимерно-битумные дорожные на основе блоксополимеров типа стирол-бутадиен-стирол: ГОСТ Р 52056–2003. Введ. 23.05.2003. М.: Стандартинформ, 2007. 13 с.

13. Битум и битумные вяжущие. Метод определения температуры размягчения по кольцу и шару: СТБ EN 1427–2009. Введ. 01.01.2010. Минск: Госстандарт, 2009. 11 с.

14. Битум и битумные вяжущие. Метод определения глубины проникания иглы: СТБ EN 1426–2009. Введ. 01.01.2010. Минск: Госстандарт, 2009. 16 с.

15. Битум и битумные вяжущие. Метод определения температуры хрупкости по Фраасу: СТБ EN 12593–2009. Введ. 25.06.2009. Минск: Госстандарт, 2009. 10 с.

16. Bitumen and bituminous binders. Visualisation of polymer dispersion in polymer modified bitumen: BS EN 13632–2010. Approved 23.04.2010. Brussels: European committee for standardization, 2010. P. 10.

17. Laukkanen O.-V., Hilde S., Winter H. H., Seppälä J. Low-temperature rheological and morphological characterization of SBS modified bitumen // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 44, no. 8. P. 348–359. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.160.

18. Mirwald J., Hofko B., Pipintakos G., Blom J., Soenen H. Comparison of microscopic techniques to study the diversity of the bitumen microstructure // *Micron*. 2022. Vol. 159. 15 p.

References

1. Gureev A. A. *Neftyanyye vyazhushchiye materialy* [Petroleum binders]. Moscow, Nedra Publ., 2018. 239 p. (In Russian).

2. Grudnikov I. B. *Proizvodstvo neftyanykh bitumov* [Production of petroleum bitumen]. Moscow, Khimiya Publ., 1983. 192 p. (In Russian).

3. Gokhman L. M. *Bitumy, polimerno-bitumnyye vyazhushchiye, asfal'tobeton, polimerasfal'tobeton* [Bitumen, polymer-bitumen binders, asphalt concrete, polymer asphalt concrete]. Moscow, EKON Publ., 2008. 118 p. (In Russian).

4. Varen'ko V. A. Experience of using modified bitumen and asphalt concrete in the Republic of Belarus. *Vestnik KhNADU* [Bulletin of the Kharkiv National Automobile and Highway University], 2017, no. 79, pp. 80–88 (In Russian).

5. STB 1220-2020. Modified road bitumen. Specifications. Minsk, Gosstandart Publ., 2020. 16 p. (In Russian).

6. Kishchynskyi S., Nagaychuk V., Bezuglyi A. Improving Quality and Durability of Bitumen and Asphalt Concrete by Modification Using Recycled Polyethylene Based Polymer Composition. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 143, pp. 119–127. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.016.

7. Okhotnikova S. E., GaneevaIgor Y. M., Frolov I. N., Yusupova T. N., Fazylzyanova G. R. Structural characterization and application of bitumen modified by recycled polyethylenes. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 316, pp. 126–138. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126118.

8. Hong Z. Effect of styrene-butadiene-styrene (SBS) on laboratory properties of low-density polyethylene (LDPE)/ethylene-vinyl acetate (EVA) compound modified asphalt. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 338, pp. 282–289.

9. Joohari I. B., Maniam S., Giustozzi F. Influence of compatibilizers on the storage stability of hybrid polymer-modified bitumen with recycled polyethylene. *Plastic Waste for Sustainable Asphalt Roads*, Woodhead Publishing, 2022, pp. 215–232.

10. Stepanovich Yu. A., Shrubok A. O., Yusevich A. I. Optimization of the Composition of Polymer-Bitumen Binders Using Experiment Planning Methods. *Tekhnologiya organicheskikh veshchestv: materialy 85-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov* [Technology of organic substances: materials of the 85th scientific and technical conference of faculty, researchers and graduate students]. Minsk, 2021, pp. 129–130 (In Russian).

11. Shrubok A. O., Stepanovich Yu. A. Principles of creating stable polymer-bitumen compositions. *Materialy, oborudovaniye i resursosberegayushchiye tekhnologii: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Materials, equipment and resource-saving technologies: materials of the International Scientific and Practical Conference]. Mogilev, 2021, pp. 269–270 (In Russian).

12. GOST R 52056–2003. Polymer-bitumen binders for roads on the basis of block copolymers of styrene-butadiene-styrene type. Specifications. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 13 p. (In Russian).

13. STB EN 1427-2009. Bitumen and bituminous binders. Method for determination of softening point by ring and ball. Minsk, Gosstandart Publ., 2010. 11 p. (In Russian).

14. STB EN 1426-2009. Bitumen and bituminous binders. Method for determination of penetration. Minsk, Gosstandart Publ., 2010. 16 p. (In Russian).

15. STB EN 12593-2009. Bitumen and bituminous binders. Method for determination of the Fraass breaking point. Minsk, Gosstandart Publ., 2009. 10 p. (In Russian)

16. BS EN 13632-2010. Bitumen and bituminous binders. Visualisation of polymer dispersion in polymer modified bitumen. Brussels, European committee for standardization, 2010. 10 p.

17. Laukkanen O.-V., Hilde S., Winter H. H., Seppälä J. Low-temperature rheological and morphological characterization of SBS modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 44, no. 8, pp. 348–359. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.160.

18. Mirwald J., Hofko B., Pipintakos G., Blom J., Soenen H. Comparison of microscopic techniques to study the diversity of the bitumen microstructure. *Micron*, 2022, vol. 159, 15 p.

Информация об авторах

Степанович Юрий Алексеевич – аспирант. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: yurystepanovich@belstu.by

Шрубок Александра Олеговна – кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазопереработки и нефтехимии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: shrubok@belstu.by

Information about the authors

Stepanovich Yuriy Alekseevich – PhD student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yurystepanovich@belstu.by

Shrubok Aleksandra Olegovna – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Oil and Gas Processing and Petroleum Chemistry. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shrubok@belstu.by

Поступила 08.04.2022