

УДК 665.775.4

А. О. Шрубок, Б. Ж. Хаппи Вако, Ю. А. Степанович
Белорусский государственный технологический университет

АНАЛИЗ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СТАБИЛЬНОСТИ ПОЛИМЕРНО-БИТУМНЫХ ВЯЖУЩИХ

В статье приведен анализ методов оценки стабильности полимерно-битумных вяжущих. Рассмотрены достоинства и недостатки существующих методов исследования. Показано, что применение визуальных методов оценки структуры полимерно-битумных вяжущих не всегда позволяет прогнозировать их эксплуатационные свойства. На основании анализа современных методов изучения структуры, состава и свойств полимерно-битумных композиций предложена усовершенствованная методика оценки их стабильности при длительном хранении и транспортировке. Предложенная методика позволила установить хорошую совместимость нефтяного битума и сополимеров этилена и винилацетата и высокую стабильность полученных битумно-полимерных композиций.

Ключевые слова: нефтяной битум, полимерные модификаторы, совместимость, методы исследования, стабильность, полимерно-битумное вяжущее.

A. O. Shrubok, B. J. Happi Wako, Yu. A. Stepanovich
Belarusian State Technological University

ANALYSIS AND IMPROVEMENT OF METHODS FOR ESTIMATING THE STABILITY OF POLYMER-BITUMINOUS BINDERS

This article contains an analysis of methods for evaluating the stability of polymer-bitumen binders. There was examined the advantages and disadvantages of existing research methods. In addition, we demonstrated that the use of visual methods for assessing the structure of polymer-bitumen binders does not always allow us to predict their operational properties. According to the analysis of modern methods for studying the structure, composition and properties of polymer-bitumen compositions, we proposed a methodology for assessing their stability during long-term storage and transportation. This methodology allowed us to establish good compatibility of petroleum bitumen and ethylene vinyl acetate co-polymers and high stability of the obtained bitumen-polymer compositions.

Key words: petroleum bitumen, polymer modifiers, compatibility, research methods, stability, polymer-bitumen binder.

Введение. Качественное полимерно-битумное вяжущее (ПБВ) в составе асфальтобетонного покрытия позволяет существенно снизить затраты на эксплуатацию и ремонт дорог за счет увеличения интервала пластичности, долговечности и деформационной устойчивости асфальтобетонного покрытия. Современные тенденции развития дорожной отрасли характеризуются повышением доли полимерно-битумных вяжущих в общем объеме битумного рынка. По оценкам специалистов [1], доля производства ПБВ к 2020–2025 гг. достигнет в Азии – 7–20%, Европе – 12–25%, Северной Америке – 12–30%, а в России и странах СНГ – 6–8%.

Однако несовершенство нормативных правовых актов в области применения модифицированных битумов, трудности их приготовления, низкая стабильность ПБВ при длительном хранении и транспортировке, высокая стоимость полимерных модификаторов – одни из многих причин, которые приводят к задержкам роста повсеместного применения ПБВ в дорожном

строительстве Республики Беларусь. Указанные проблемы обусловлены низкой совместимостью полимеров и нефтяных битумов и отсутствием четких критериев приготовления ПБВ, обеспечивающих их стабильность в условиях хранения, транспортировки и эксплуатации в составе асфальтобетонных смесей.

Основная часть. Согласно современным знаниям о структуре битумных вяжущих [2], они представляют собой коллоидную систему, дисперсной фазой в которой являются высокомолекулярные органические и гетероатомные соединения (асфальтены и парафины), а дисперсионной средой – смолы и масла (рис. 1). На формирование коллоидной структуры битумов огромное влияние оказывает групповой состав его структурных компонентов. Поскольку асфальтены и смолы являются основными структурообразующими компонентами битумов, то изменение в их соотношении приводит к изменению физико-химических свойств битумных вяжущих.

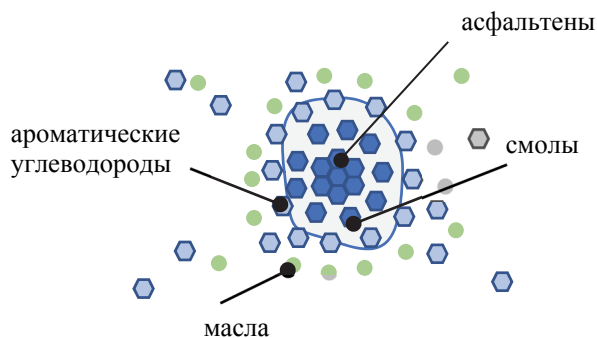


Рис. 1. Коллоидная структура битума

Пенетрация битума возрастает, а его температуры размягчения и хрупкости снижаются при увеличении соотношения масла : асфальтены и практически не зависят от количества смол. Установлено, что введение в нефтяной битум дополнительного количества частиц твердой фазы, в частности полимерной добавки, обуславливает формирование полимерного каркаса и переход битума из одного дисперсного состояния («золь», «золь-гель») в другое («золь-гель», «гель») [3, 4]. Однако, как показывает практика, для создания в полимерно-битумной композиции пространственной каркасной сетки полимера необходимо добиться равномерного распределения полимерной добавки во всем объеме битума.

Как известно, термодинамическая стабильность полимерно-битумного материала во многом определяется размером его частиц. В случае совместимости полимера и нефтяного битума частицы полимера набухают в мальтеновой части битума, распределяются по всему его объему и полимерно-битумное вяжущее длительное время находится в однородном состоянии. В случае плохой совместимости полимера и нефтяного битума наблюдается выделение полимерной фазы и расслоение полимерно-битумного материала.

В связи с этим одним из наиболее важных параметров, характеризующих совместимость полимера и битума и стабильность получаемых полимерно-битумных вяжущих, является групповой химический состав битумов, который определяется природой и компонентным составом исходного нефтяного сырья, а также технологией его производства. Для определения группового состава нефтяных битумов могут применяться различные методы: действие избирательными растворителями, адсорбционная хроматография, термомодиффузия, ИК-спектроскопия, ЯМР, люминесцентный анализ, препаративная тонкоструйная хроматография, адсорбционно-жидкостная хроматография [5–7]. Применяя различные методы разделения битумов, получают различные результаты по числу групп, их содержанию и

структуре. Исследование углеводородного состава битумов и соотношения групп компонентов позволяет прогнозировать физико-химические и эксплуатационные свойства получаемых продуктов. Так, масла снижают твердость и температуру размягчения нефтяных битумов, увеличивают их текучесть и испаряемость, наличие большого количества парафиновых углеводородов ведет к нарушению однородности и повышению температуры хрупкости битума. Смолы, выделенные из битума, представляют собой высокомолекулярные органические соединения циклической и гетероциклической структуры высокой степени конденсации и определяют их твердость, пластичность и растяжимость. Асфальтены – наиболее высокомолекулярные соединения битума, представляющие собой твердые неплавящиеся хрупкие вещества кристаллоподобной и аморфной структуры. Доля асфальтенов в битуме определяет его вязкость и хрупкость, температурную устойчивость. Изменение в соотношении основных компонентов нефтяного битума: асфальтенов, смол и масел, – приводит к изменению физико-химических свойств битумных вяжущих и оказывает значительное влияние на совместимость битума с полимерными модификаторами.

Анализ научно-технической информации показывает [8–11], что степень совместимости нефтяного и полимерного компонентов в полимерно-битумном материале может быть оценена по растворимости последнего в толуоле, близком по параметру растворимости с мальтеновой фракцией битума. Параметр растворимости мальтеновой фазы нефтяного битума изменяется в определенном диапазоне, и для хорошей совместимости полимера с битумом параметр растворимости полимера также должен находиться внутри этого диапазона. Среднее значение параметра растворимости полимеров (сополимеров), имеющих основаниями стирол и бутадиев или этиленвинилацетат, очень близко к среднему значению этого параметра для мальтеновой фазы битума, что свидетельствует о хорошей совместимости этих полимеров с большинством типов битумов. Поскольку взаимодействие между молекулами нефтяного битума и полимера во многом зависит от их полярности и взаимного сродства, то совместимость компонентов битумно-полимерного вяжущего также будет зависеть от факторов, влияющих на их взаимную растворимость: структуры полимера, способов приготовления битумно-полимерного вяжущего и т. д.

Кроме того, в последние годы все больше внимания уделяют микроскопическим методам исследования структуры полимерно-битумных вяжущих и распределения частиц полимера

в битуме, что в совокупности позволяет оценить совместимость битумного и полимерного компонента (например, электронно-сканирующая и зондовая микроскопия [12–14]).

При высоких температурах полимерно-битумное вяжущее представляет собой однородный материал, но при снижении температуры все полимерно-битумные вяжущие состоят из нескольких фаз, гомогенность и распределение которых в объеме материала значительно влияют на эксплуатационные свойства материала. Следует отметить, что морфология полимерно-битумных вяжущих зависит от целого ряда факторов: технологии смешения компонентов вяжущих, природы и концентрации полимерного модификатора, природы исходного нефтяного битума. Установлено, что совместимость системы полимер – битум во многом зависит от структурно-группового состава используемого битума: увеличение содержания асфальтенов приводит к увеличению среднего размера частиц дисперсной фазы в 5–7 раз. В работе [14] для оценки влияния коллоидной структуры битума на совместимость со смесевыми олефиновыми термоэластопластами был изучен фазовый состав битумов и битумно-полимерных композиций с помощью калориметрии, морфология поверхности битумных пленок методом атомно-силовой микроскопии и структурно-реологические свойства. Показано, что улучшение эксплуатационных характеристик полимерно-битумного вяжущего при использовании одного и того же модификатора определяется структурным типом нефтяного битума. Так, для битумов типа «гель» улучшение свойств ПБВ связано с растворением низкомолекулярной составляющей модификатора и изменением свойств дисперсионной среды битума, а для битумов типа «золь-гель» – с набуханием модификатора и формированием фрагментов эластомерной сетки.

Оценка морфологии смесей нефтяного битума и синтетических полимеров с помощью микроскопических методов исследования позволяет оценить дисперсность и однородность ПБВ при нормальных условиях. Чем выше дисперсность получаемых смесей, тем лучше совместимость битума с полимером и однородность вяжущего во всем объеме. Однако в условиях транспортировки и хранения ПБВ склонны к расслоению ввиду агрегации частиц дисперсной фазы и обратной седиментации частиц полимера [15], и данные, полученные при исследовании морфологии битумно-полимерных материалов методами микроскопии, не всегда позволяют прогнозировать стабильность ПБВ в реальных условиях их эксплуатации. Высокую информативность при анализе фазового состава битумно-полимерных смесей показал метод

дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) [16–19]. Введение полимерного модификатора существенно и неаддитивно меняет внутреннее строение системы полимер – битум, что отражается на характере кривых ДСК.

Таким образом, наиболее перспективными методами для оценки совместимости полимера и нефтяного битума являются использование микроскопии и дифференциального термического анализа, однако данные методы анализа не позволяют достоверно установить равномерность распределения полимера в объеме битума и прогнозировать стабильность полимерно-битумного вяжущего в реальных условиях эксплуатации, т. е. при длительном хранении и транспортировке.

Стоит также отметить, что совместимость компонентов полимерно-битумного вяжущего изменяется под воздействием внешних факторов в процессе хранения и приготовления асфальтобетонной смеси (температура, давление, воздействие кислорода воздуха), поэтому применение рассмотренных методов не всегда достоверно свидетельствует о стабильности получаемых композиций в реальных условиях их эксплуатации. В связи с этим в работах некоторых исследователей внимание уделяется не оценке термодинамической совместимости компонентов битумно-полимерного вяжущего, а так называемой эксплуатационной совместимости (стабильности), т. е. изменению комплекса свойств в процессе эксплуатации вяжущего [20, 21].

В стандартах ГОСТ EN 13399, ASTM D 7173–11 [22, 23] предложена методика оценки совместимости по изменению эксплуатационных свойств и структуры битумно-полимерного вяжущего в различных точках материала после длительного воздействия различных внешних факторов. Первая методика основана на симуляции хранения битума в резервуаре. Для этого образец битума заливается в алюминиевый тубик диаметром 25 мм и длиной от 125 мм до 140 мм. Образец выдерживается при температуре 165°C в течение 48 ч в вертикальном положении, после чего охлаждается и разрезается на три части. Для верхнего и нижнего слоев ПБВ определяют температуру размягчения и соотносят со значением для исходного вяжущего. Этот способ позволяет оценить стабильность вяжущего в процессе транспортировки и хранения, однако не предоставляет информацию о причинах разделения, а также о взаимосвязи между склонностью к расслоению и поведению при приготовлении асфальтобетонных покрытий. Такая методика отличается высокой длительностью анализа и затратами.

В работах [24, 25] предложена процедура оценки стабильности битумно-полимерного

вяжущего, отличающаяся от стандартных методов. В процедуре предусмотрено два основных этапа: внешний нагрев без перемешивания и нагрев с интенсивным перемешиванием. Эти этапы позволяют воссоздать реальные условия хранения и транспортировки ПБВ и прогнозировать изменение эксплуатационных свойств для каждой системы полимер – битум, так как при идентичных условиях приготовления полимерно-битумных композиций различные марки полимеров по-разному совмещаются с битумом и в разной степени влияют на изменение его качественных характеристик.

Таким образом, анализ современных методов оценки стабильности полимерно-битумных вяжущих позволил выявить их достоинства и недостатки и предложить новую методику оценки стабильности ПБВ. Объектами исследования являлись однородные битумно-полимерные материалы, полученные смешением нефтяного битума (табл. 1) и сополимеров этилена и винилацетата серии ЭВАТЕН марки UE 654-04 (табл. 2). Оптимальная концентрация полимера при приготовлении полимерно-битумного вяжущего составляла 2–5 мас. %. Основные характеристики полученных однородных полимерно-битумных вяжущих представлены в табл. 3.

Длительное хранение ПБВ может приводить к расслаиванию ПБВ, поэтому для оценки стабильности полученные однородные ПБВ выдерживали в течение длительного времени (7–10 дней) и только после этого образцы готовили для анализа в соответствии с методикой [22]: битумно-полимерные композиции расплавляли и заливали в трубку (вертикальный резервуар).

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	минус 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	0
Групповой состав, мас. %:	
асфальтены	9,8
масла	74,16
смола	16,04

Таблица 2

Свойства сополимера этилена и винилацетата

Показатель	Значение
Массовая доля винилацетата, мас. %	33
Показатель текучести расплава, г/10 мин	30
Плотность при 20°C, г/см ³	0,955
Точка расплава, °C	63
Относительное удлинение, %	900
Температура размягчения по методу кольца и шара, °C	105
Предел прочности при разрыве, кг/см ²	70

Таблица 3

Характеристика полимерно-битумных вяжущих

Показатель	Полимерно-битумное вяжущее			
	0	2	3	5
Количество добавки, мас. %				
Температура размягчения по КиШ, °C	51±2	55±2	58±2	60±2
Пенетрация, 0,1 мм	89±8	73±8	52±8	55±8
Температура хрупкости, °C	-18	-18	-21	-16,2
Интервал пластичности, °C	69	73	79	76,2
Индекс пенетрации	0,3	0,6	0,7	1,3
Однородность	Однороден			

Кроме того, в реальных условиях при хранении вяжущие подвергаются не только нагреву, но и охлаждению, что может оказывать негативное влияние на их стабильность. В связи с этим, в отличие от методик [22, 23], в предлагаемой методике оценки стабильности предложено использовать циклы охлаждения – нагрева образца битума. Подготовленные образцы выдерживали при температуре 163°C в течение 10 ч, охлаждали при комнатной температуре в течение 10 ч, количество циклов нагрев – охлаждение составляло 3.

После окончания испытаний трубки с битумом разрезали на три части и для каждой части определяли температуру размягчения по КиШ не менее трех раз. Стабильность битумно-полимерных композиций оценивали по среднему стандартному отклонению температуры размягчения в различных точках образца битума. Согласно полученным экспериментальным данным (рис. 2), во всем объеме битума среднее стандартное отклонение температуры размягчения составило 0,15–0,30°C (0,3–0,6%), при этом стандартное отклонение повторяемости и воспроизводимости для метода определения температуры размягчения составляет 0,41 и 0,70°C соответственно.

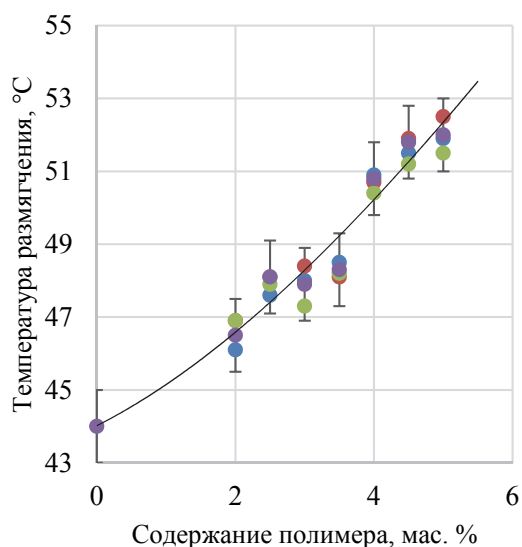


Рис. 2 Стабильность битумно-полимерного вяжущего

Полученные результаты свидетельствуют о хорошей коллоидной стабильности полученных полимерно-битумных композиций на основе нефтяного битума и сополимеров этилена и винилацетата.

Заключение. Проведен анализ существующих методов оценки стабильности полимерно-битумных вяжущих, на основании которого предложена усовершенствованная методика оценки стабильности полимерно-битумного вяжущего. Предложенная методика позволила установить хорошую совместимость нефтяного битума и сополимеров этилена и винилацетата и высокую стабильность полученных битумно-полимерных композиций.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ в рамках научного проекта № Т19М-049 «Разработка принципов создания битумно-полимерных композиционных материалов повышенной стабильности».

Список литературы

1. Гуреев А. А. Нефтяные вяжущие материалы. М.: Изд. дом «Недра», 2018. 239 с.
2. Гун Р. Б. Нефтяные битумы. М.: Химия, 1989. 432 с.
3. Сюняев З. И., Сюняев Р. З., Сафиева Р. З. Нефтяные дисперсные системы. М.: Химия, 1990. 226 с.
4. Колбановская А. С. Исследование дисперсных структур в нефтяных битумах с целью получения оптимального материала для дорожного строительства: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М. 1967. 54 с.
5. Иванова, Л. В., Сафиева Р. З., Кошелев В. Н. ИК-спектроскопия в анализе нефти и нефтепродуктов // Вестник Башкирского университета. 2008. № 4. С. 869–874.
6. Trejo F. Precipitation, fractionation and characterization of asphaltenes // Fuel. 2004. No. 83. P. 2169–2175.
7. Битумы. Экспрессная идентификация групп ароматических соединений / В. П. Томин [и др.] // Нефтепереработка и нефтехимия. 2010. № 2. С. 6–9.
8. Zhu J. The use of solubility parameters and free energy theory for phase behaviour of polymer-modified bitumen: a review // Road Materials and Pavement Design. 2019. URL: <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1645725> (дата обращения: 03.03.2020).
9. Redelius P. Bitumen solubility model using Hansen solubility parameter // Energy & Fuels. 2004. No. 18. P. 1087–1092.
10. Airey G. D. Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens // Fuel. 2003. No. 82. P. 1709–1719.
11. Принципы подбора состава смесевых растворителей полимеров / А. С. Неверов [и др.] // Вестник НАНБ. 2013. № 3. С. 10–17.
12. Влияние совместимости нефтяных битумов и стирол-бутадиен-стирольных полимеров на дисперсность и эксплуатационные характеристики полимерно-битумных композиций / С. В. Гавер [и др.] // Известия СПбГТИ. 2016. № 36. С. 68–71.
13. Rheological characterization of storage-stable SBS-modified asphalts / G. Wen [et al.] // Polymer Testing. 2002. No. 21. P. 295–302.
14. Оценка совместимости олефиновых термоэластопластов с окисленными битумами различной коллоидной структуры / Ю. М. Ганеева [и др.] // Журнал прикладной химии. 2010. Т. 83, № 7. С. 1183–1187.
15. Теоретические аспекты расслаиваемости битумполимерных вяжущих / Д. А. Аюпов [и др.] // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19, № 23. С. 50–52.
16. Физико-химические особенности модификации товарных битумов смесевыми олефиновыми термоэластопластами / И. Н. Фролов [и др.] // Нефтегазовое дело. 2008. URL: <http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Frolov/Frolov1.pdf> (дата обращения: 03.03.2020).
17. Thermodynamics, phase diagrams, and stability of bitumen-polymer blends / J. F. Masson [et al.] // Energy & Fuels. 2003. No. 17. P. 714–724.

18. Thermal and oxidative decomposition of bitumen at the Microscale: Kinetic inverse modeling / Marco A. B. Zanoni [et al.] // *Fuel*. 2020. No. 264. P. 1–11.

19. Кириллова Л. Г. Модификация битумов полимерными добавками: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Казань. 2000. 16 с.

20. Fawcett A. H., McNally T. Blends of bitumen with polymers having a styrene component // *Polymer Engineering and Science*. 2001. Vol. 41, No 7. P. 1251–1264.

21. Kaya D., Topal A., McNally T. Relationship between processing parameters and aging with the rheological behaviour of SBS modified bitumen // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 221. P. 345–350.

22. Битумы и битуминозные вяжущие. Определение стабильности модифицированных битумов при хранении: ГОСТ EN 13399-2013. Введ. 01.04.2016. Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2016. 8 с.

23. Standard Practice for Determining the Separation Tendency of Polymer from Polymer Modified Asphalt: ASTM D 7173:2011. American Society for Testing and Materials, 2011. 2 p.

24. Bahia H. U., Zhai H. Storage stability of modified binders using the newly developed LAST procedure // *Road Materials and Pavement Design*. 2000. Vol. 1, no. 1. P. 53–73.

25. Lu X., Isacson U. Compatibility and storage stability of styrene-butadiene-styrene copolymer modified bitumens. // *Materials and Structures*. 1997. Vol. 30, no. 10. P. 618–626.

References

1. Gureev A. A. *Neftyanyye vyazhushchiye materialy* [Petroleum binders]. Moscow, Nedra Publ., 2018. 239 p.
2. Gun R. B. *Neftyanyye bitumy* [Petroleum bitumen]. Moscow, Khimiya Publ., 1989. 432 p.
3. Syunyaev Z. I., Syunyaev R. Z., Safieva R. Z. *Neftyanyye dispersnyye sistemy* [Oil Dispersed Systems]. Moscow, Khimiya Publ., 1990. 226 p.

4. Kolbanovskaya A. S. *Issledovaniye dispersnykh struktur v neftyanykh bitumakh s tsel'yu polucheniya optimal'nogo materiala dlya dorozhnogo stroitel'stva. Avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk* [The study of dispersed structures in oil bitumen in order to obtain the optimal material for road construction. Abstract of thesis doct. of techn. sci.]. Moscow, 1967. 54 p.

5. Ivanova, L. V., Safieva R. Z., Koshelev V. N. IR spectrometry in the analysis of oil and oil products. *Vestnik Bashkirskogo universiteta* [Bulletin of the University of Bashkir]. 2008, no 4, pp. 869–874 (In Russian).

6. Trejo F. Precipitation, fractionation and characterization of asphaltenes. *Fuel*, 2004, no. 83, pp. 2169–2175.

7. Tomin V. P., Parashchenko V. I., Prudnikova E. V., Mozilina O. V. Bitumen. Express identification of aromatic groups. *Neftepererabotka i neftekhimiya* [Oil refining and petrochemistry], 2010, no. 2. pp. 6–9 (In Russian)

8. Zhu J. The use of solubility parameters and free energy theory for phase behaviour of polymer-modified bitumen: a review. *Road Materials and Pavement Design*. 2019. Available at: <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1645725> (accessed: 03.03.2020).

9. Redelius P. Bitumen solubility model using Hansen solubility parameter. *Energy & Fuels*, 2004, no. 18, pp. 1087–1092.

10. Airey G. D. Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens. *Fuel*. 2003, no. 82, pp. 1709–1719.

11. Neverov A. S., Samuseva L. V., Gromyko Zh. N., Vlasenko D. A. The principles of selection of the composition of mixed solvents of polymers. *Vestsi NANB* [Bulletin of BNAS], 2013, no. 3, pp. 10–17 (In Russian).

12. Gaver S. V., Urcheva Yu. A., Syroezhko A. M., Vasil'yev V. V. The effect of the compatibility of petroleum bitumen and styrene-butadiene-styrene polymers on the dispersion and performance characteristics of polymer-bitumen compositions. *Izvestiya SPbGTI* [Bulletin of STISP], 2016, no. 36, pp. 68–71 (In Russian).

13. Wen G., Zhang Y., Zhang Y., Sun K., Fan Y. Rheological characterization of storage-stable SBS-modified asphalts. *Polymer Testing*, 2002, no. 21, pp. 295–302.

14. Ganeeva Yu. M., Yusupova T. N., Ohotnikova E. S., Frolov I. N., Buharayev A. A., Ziganshina S. A. Assessment of the compatibility of olefin thermoplastic elastomers with oxidized bitumen of various colloidal structure. *Zhurnal prikladnoy khimii* [Journal of Applied Chemistry], 2010, vol. 83, no. 7, pp. 1183–1187 (In Russian).

15. Ayupov D. A., Khakimullin Yu. N., Makarov D. B., Kazakulov R. I. Theoretical aspects of delamination of bitumen polymer binders. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the technological university], 2016, vol. 19, no. 23, pp. 50–52 (In Russian).

16. Frolov I. N., Yusupova T. N., Ganeeva Yu. M., Barskaya E. E., Romanov G. V. Physico-chemical features of the modification of commercial bitumen mixed olefin thermoplastic elastomers. *Neftegazovoye delo* [Oil and gas business]. Available at: <http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Frolov/Frolov1.pdf> (accessed: 03.03.2020) (In Russian).

17. Masson J. F., Collins P., Robertson G., Woods J. R. Thermodynamics, phase diagrams, and stability of bitumen-polymer blends. *Energy & Fuels*, 2003, no.17, pp. 714–724.

18. Zaroni Marco A. B., Rein G., Yerman L., Gerhard J. I. Thermal and oxidative decomposition of bitumen at the Microscale: Kinetic inverse modeling. *Fuel*, 2020, no. 264, pp. 1–11.

19. Kirillova L. G. *Modifikatsiya bitumov polimernymi dobavkami. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Modification of bitumen with polymer additives. Abstract of thesis cand. of techn. sci.]. Kazan, 2000. 16 p.

20. Fawcett A. H., McNally T. Blends of bitumen with polymers having a styrene component. *Polymer Engineering and Science*, 2001, vol. 41, no 7, pp. 1251–1264.

21. Kaya D., Topal A., McNally T. Relationship between processing parameters and aging with the rheological behaviour of SBS modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 221, pp. 345–350.

22. GOST EN 13399-2013. Bitumens and bituminous binders. Determination of the stability of modified bitumen during storage. Minsk, BSISC Publ., 2016. 8 p. (In Russian).

23. ASTM D 7173:2011. Standard Practice for Determining the Separation Tendency of Polymer from Polymer Modified Asphalt. American Society for Testing and Materials, 2011. 2 p.

24. Bahia H. U., Zhai H. Storage stability of modified binders using the newly developed LAST procedure. *Road Materials and Pavement Design*, 2000, vol. 1, no. 1, pp. 53–73.

25. Lu X., Isacsson U. Compatibility and storage stability of styrene-butadiene-styrene copolymer modified bitumens. *Materials and Structures*, 1997, vol. 30, no. 10, pp. 618–626.

Информация об авторах

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

Хаппи Вако Блэк Жюниор – аспирант. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: wakojunior@mail.ru

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

Information about the authors

Shrubok Aleksandra Olegovna – PhD (Engineering), Senior Lecturer, 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

Happi Wako Black Junior – PhD student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: wakojunior@mail.ru

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

Поступила 14.04.2020