

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОМПОНЕНТОВ МОДИФИЦИРУЮЩЕЙ ДОБАВКИ В ПРОЦЕССЕ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНО-БИТУМНОГО ВЯЖУЩЕГО

**В. А. Фролов, П. С. Беляев, П. В. Макеев,
В. П. Беляев, И. В. Шашков**

*Кафедра «Материалы и технология», polymers@asp.tstu.ru;
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: модификация битума; поверхностно-активные вещества; полимерно-битумное вяжущее; полиэтилен; смешение; термоэластопласт.

Аннотация: Для получения полимерно-битумных вяжущих (ПБВ) используют процессы смешения различных модификаторов с нефтяными битумами в целях придания вяжущему более высоких качественных показателей по сравнению с исходным материалом. Проблема поиска составов модификаторов, обеспечивающих полный спектр требуемых показателей дорожных вяжущих, остается актуальной. Рассмотрены особенности использования для модифицирования битумов смешанного типа модификаторов на основе термоэластопластов и термопластов. Исследованы отклики в виде изменений показателей качества вяжущего при смешении битумов с различными объемами термоэластопласта и термопласта, в присутствии или отсутствии поверхностно-активных веществ, а также их смесей различного состава. В результате проведенных исследований разработана математическая модель зависимости характеристик ПБВ от содержания вводимых в процессе смешения компонентов.

Развитие современного общества происходит в условиях постоянного увеличения грузовых автомобильных перевозок, растущих нагрузок на ось транспортных средств, интенсивности движения. Перевозки осуществляются в неблагоприятных климатических условиях, что приводит к преждевременному износу дорожных покрытий, уменьшению межремонтных циклов и увеличению затрат на строительство и эксплуатацию дорог. Исследования показывают, что при безусловном соблюдении технологии укладки дорожных покрытий их низкая долговечность определяется недостаточными качественными показателями используемого нефтяного битума. Поэтому битумы подвергают процессам модификации, причем в подавляющем большинстве случаев при этом используют полимерные материалы [1, 2]. Наиболее часто для модификации битумов используют термоэластопласты типа стирол-бутадиен-стирол (СБС) [3 – 5], которые характеризуются сравнительно высокой стоимостью. Полимерно-битумные вяжущие (ПБВ) на основе термоэластопластов имеют ряд недостатков, например, склонность к расслаиванию, низкую адгезию к минеральным материалам асфальтобетонной смеси, поэтому в состав ПБВ вводят специальные поверхностно-активные вещества (ПАВ) [1, 6]. С другой стороны, существует проблема утилизации отходов полимерной упаковки, которые гипотетически могут быть использованы для модификации битумов [7]. Однако многочисленные попытки применения для моди-

фикации битумов, например, полиолефинов, широко используемых для производства упаковки, не выявили возможности получения конкурентных преимуществ получаемых на их основе ПБВ [3, 8 – 10]. Поэтому необходимы дальнейшие исследования в направлении утилизации отходов полимерной тары и упаковки путем их использования для модификации битумов. В данной работе представлены результаты изменения характеристик нефтяного дорожного битума в процессах смешения с термоэластопластом, полиэтиленом низкой плотности, ПАВ и их различными сочетаниями.

Объекты исследования – нефтяной дорожный битум марки БНД 90/130, термоэластопласт ДСТ-30-01 производства ПАО «СИБУР Холдинг», полиэтилен низкой плотности, поверхностно-активные вещества Дорос-АП, АМДОР-9, АМДОР-10, Адгезол-5 и ПБВ на их основе.

Для проведения процесса совмещения битумов с полимерами разработана и изготовлена специальная лабораторная установка, имеющая в своем составе два лопастных смесителя объемами 3 и 5 литров [11]. Оба смесителя характеризуются полным геометрическим подобием и обеспечивают возможность исследования влияния масштабного перехода на процесс совмещения компонентов ПБВ. Смеситель имеет цилиндрический корпус с плоским приваренным днищем. Сверху корпус закрывается крышкой, на которой расположены патрубок для загрузки и подшипниковый узел вала перемешивающего устройства с сальниковым уплотнением, термомпара для контроля температуры. На валу находятся смесительные органы: лопастные мешалки. Вращение перемешивающего устройства осуществляется посредством клиноременной передачи со сменными шкивами. Корпус смесителя снабжен системой электрического обогрева, с помощью которой устанавливается заданный температурный режим. Электродвигатель привода оснащен частотным преобразователем для бесступенчатого регулирования частоты вращения рабочих органов. Смесительные органы имеют противоположные углы наклона лопастей и создают встречные вертикальные потоки материала, а лопастные центробежные мешалки – радиальные потоки, что приводит к интенсивному турбулентному режиму смешения.

Совмещение компонентов проводили при различных значениях циркуляционного критерия Рейнольдса, температурах до 160 °С и времени процесса до 90 минут. Показатели ПБВ исследовали в соответствии с европейскими и российскими стандартами [11, 12].

Цель исследований – нахождение режимных параметров проведения процесса модификации битума и построение математических зависимостей, обеспечивающих прогнозирование свойств дорожного вяжущего, возможность постановки и решения задачи оптимизации в соответствии с выбранными критериями.

Мониторинг изменения характеристик нефтяного дорожного битума вначале проводили с каждым из компонентов в отдельности. Затем исследовали их совместное воздействие в направлении достижения качественных показателей, сравнимых с требованиями ГОСТ Р для ПБВ-60 [12], рекомендованного для использования в средней климатической зоне России.

В результате исследований установлено следующее. Процесс совмещения битума с модификаторами целесообразно проводить в турбулентном режиме при значении циркуляционного критерия Рейнольдса $Re_c > 1000$

$$Re_c = \frac{nd_m^2\rho}{\mu},$$

где n , d_m – частота вращения и диаметр мешалки соответственно; ρ – плотность смеси; μ – динамическая вязкость смеси при температуре 150...160 °С в течение 45...60 мин. При этом достигается достаточная равномерность распределения

полимеров в битуме с размером капель порядка $d_k \approx 9 \cdot 10^{-5} \dots 1,5 \cdot 10^{-4}$ м при скоростях вращения 800 и 450 об/мин для смесителей 3 и 5 литров соответственно.

С увеличением содержания термоэластопласта ДСТ 30-01 при его совмещении с нефтяным битумом БНД 90/130 наблюдается увеличение температуры размягчения, появление и рост важного показателя – эластичности, но при этом происходит резкое снижение глубины проникновения иглы, показатель которого имеет тенденцию к выходу за пределы требований ГОСТ Р 52056–2003 для ПБВ-60 (табл. 1). Для компенсации негативного влияния термоэластопласта на глубину проникновения иглы часто используют добавление в систему промышленных масел, однако это усугубляет проблему низкой адгезии получаемого ПБВ к минеральным материалам асфальтобетонной смеси, а также способствует процессам расслоения композиции.

С увеличением содержания полиэтилена низкой плотности при его совмещении с нефтяным битумом наблюдается меньшая интенсивность роста температуры размягчения по сравнению с модификацией термоэластопластом, менее выраженное снижение глубины проникновения иглы, а также недостаточный уровень эластичности (см. табл. 1). Это подтверждает полученные другими исследователями выводы о затруднениях в решении задачи по обеспечению перечня потребительских свойств дорожного вяжущего, получаемого в результате модификации битумов полиолефинами [3, 8, 9].

Проведены исследования влияния на показатели модифицированных битумов различных ПАВ, применяемых для повышения сцепления ПБВ на основе термоэластопластов с минеральными материалами асфальтобетонных смесей.

В результате установлено, что лучшие результаты получаются при использовании ПАВ АМДОР-10. Введение в битум БНД 90/130 вещества АМДОР-10 в количестве 0,1 – 0,5 масс.% при отсутствии термоэластопласта и полиэтилена не приводит к заметному изменению температуры размягчения и растяжимости, однако до 30 % снижает глубину проникновения иглы.

Исследована возможность частичного замещения термоэластопласта ДСТ-30-01 полиэтиленом в процессе модификации дорожных битумов в целях снижения себестоимости получаемого в результате ПБВ. Исследования показали, что в отсутствие ПАВ совместное использование термоэластопласта ДСТ-30-01 и полиэтилена не позволяет получить сопоставимые показатели модифицированного битума БНД 90/130 по сравнению с модификацией чистым термоэластопластом.

Таблица 1

**Физико-механические показатели ПБВ
при модификации термоэластопластом / термопластом**

Показатель	Содержание термоэластопласта или термопласта, масс.%				ГОСТ Р 52056–2003
	0	2	4	6	
Эластичность, %	0	$\frac{61}{9}$	$\frac{81}{10}$	$\frac{82}{10}$	80
Температура размягчения, °С	46	$\frac{55}{55}$	$\frac{75}{64}$	$\frac{89}{72}$	54
Растяжимость при 25 °С, мм	$\frac{763}{765}$	$\frac{695}{245}$	$\frac{690}{190}$	$\frac{470}{160}$	250
Глубина проникновения иглы при 25 °С, × 10 мм	114	$\frac{111}{65}$	$\frac{64}{54}$	$\frac{50}{34}$	60

Пр и м е ч а н и е : в числителе даны значения для термоэластопласта, в знаменателе – термопласта.

Только при совместном использовании всех трех агентов установлена принципиальная возможность снижения себестоимости получаемого ПБВ для достижения приемлемых показателей качества данного дорожного вяжущего. В таблице 2 представлены результаты комплексного воздействия трех агентов при модифицировании битума БНД 90/130 и содержании в ПБВ поверхностно-активного вещества АМДОР-10 в количестве 0,1 масс.%. Для построения математической модели зависимости характеристик ПБВ от состава использовали методы статистического планирования экспериментов. В результате установлена область изменения варьируемых параметров и получены математические зависимости характеристик ПБВ от содержания модифицирующих агентов. Перед планированием эксперимента проводилась оценка дисперсии воспроизводимости, для чего выполняли по три параллельных опыта в трех различных точках факторного пространства. Расчетные значения критериев Кохрена по выходным переменным: температуры размягчения Y_1 , эластичности Y_2 , глубины проникновения иглы Y_3 , растяжимости Y_4 равны соответственно 0,63; 0,5; 0,55 и 0,44.

Табличное значение критерия Кохрена для данного эксперимента $G_T = 0,871$. Поэтому результаты признаны воспроизводимыми.

В результате получены следующие математические зависимости:

$$Y_1 = 55,72 + 1,5X_1 + 5,14X_2 + 0,69X_1^2 - 0,69X_2^2 + 0,48X_1X_2; \quad (1)$$

$$Y_2 = -3,8 + 7,77X_1 + 54,3X_2 - 0,17X_1^2 - 8,91X_2^2 - 1,48X_1X_2; \quad (2)$$

$$Y_3 = 87,4 - 2,55X_1 - 10,9X_2 - 0,34X_1^2 + 0,51X_2^2 + 0,08X_1X_2; \quad (3)$$

$$Y_4 = -537,6 + 289,31X_1 + 576,44X_2 - 30,63X_1^2 - 73,37X_2^2 - 39X_1X_2. \quad (4)$$

На рисунке 1 представлены поверхности функций $Y_1 - Y_4$ в зависимости от содержания термоэластопласта (ТЕР) и полиэтилена низкой плотности (РЕ). Полученные зависимости позволяют осуществлять постановку и решение задач оптимизации состава ПБВ. Например, для южных районов РФ в качестве критерия оптимальности может быть выбрана температура размягчения. В этом случае постановка задачи оптимизации выглядит следующим образом: при выбранных

Таблица 2

Физико-механические показатели ПБВ при комплексном использовании трех модифицирующих агентов

Показатель	Содержание термоэластопласта / термопласта, масс.%								
	1/1	2/1	3/1	1/2	2/2	3/2	1/3	2/3	3/3
Эластичность, %	48	75	83	54	78	85	60	83	88
Температура размягчения, °С	63	66	68	67	71	74	73	77	81
Растяжимость при 25 °С, мм	189	508	680	339	625	751	442	676	768
Глубина проникновения иглы при 25 °С, × 10, мм	73	65	57	70	62	53	67	58	50

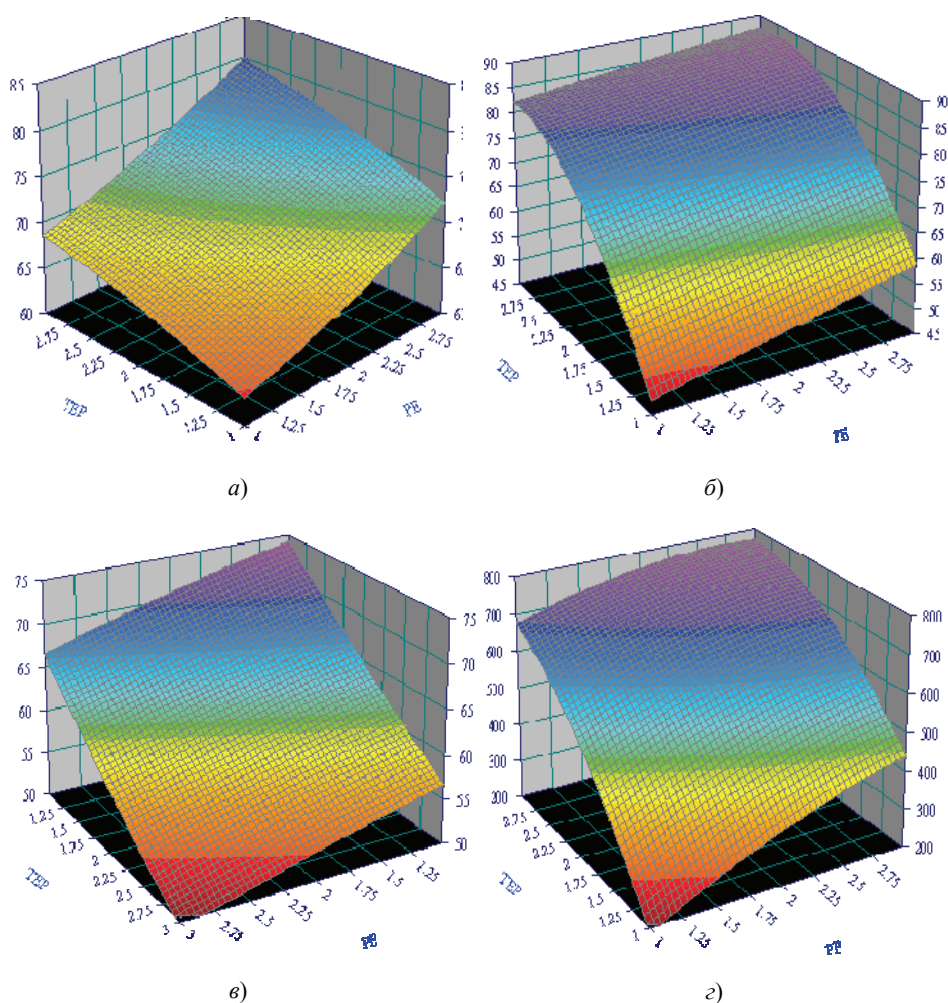


Рис. 1. Поверхность целевых функций:
a – температура размягчения, °С; *б* – эластичность, %;
в – глубина проникновения иглы, × 10 мм; *г* – растяжимость, мм

компонентах модифицирующих добавок и допустимых диапазонах изменения их содержания в дорожном вяжущем необходимо подобрать состав ПБВ, доставляющий максимум функции Y_1 при заданных ограничениях на значения функций Y_2, Y_3, Y_4 и связях в виде зависимостей (1) – (4).

Таким образом, совместное использование термоэластопласта ДСТ-30-01, полиэтилена низкой плотности и поверхностно-активного вещества АМДОР-10 в качестве компонентов модифицирующей добавки позволяет получить требуемые характеристики дорожного вяжущего в процессе совмещения с нефтяным дорожным битумом марки БНД 90/130. При этом снижается себестоимость получаемого дорожного вяжущего за счет частичной замены дорогостоящего термоэластопласта более дешевым полиэтиленом низкой плотности. Проведенные исследования открывают перспективу дополнительного снижения себестоимости ПБВ за счет использования отходов тары и упаковки, при этом решается актуальная задача утилизации длительно разлагающихся отходов термопласта [14].

Список литературы

1. The Effect of Modifying Additives on the Consistency and Properties of Bitumen Binders / A. Plewa, P. S. Belyaev, K. A. Andrianov [et al.] // *Advanced Materials & Technologies*. – 2016. – No. 4. – P. 35 – 40. doi: 10.17277/amt.2016.04.pp.035-040
2. Chen, J. S. Asphalt Modified by Styrene–Butadiene–Styrene Triblock Copolymer: Morphology and Model / J. S. Chen, M. C. Liao, M. S. Shiah // *Journal of Materials in Civil Engineering*. – 2002. – No. 14 (3). – P. 224 – 229.
3. Zhu, J. Polymer Modification of Bitumen: Advances and Challenges / J. Zhu, B. Birgisson, N. Kringos // *European Polymer Journal*. – 2014. – No. 54. – P. 18 – 38.
4. Lucena, M. C. C. Characterization and Thermal Behavior of Polymer-Modified Asphalt / M. C. C. Lucena, S. A. Soares, J. B. Soares // *Materials Research*. – 2004. – No. 7 (4). – P. 529 – 534.
5. Radiation Effects on Styrene–Butadiene–Styrene Copolymer / Y. Zhang, S. Zhao, Y. Li [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2008. – Vol. 266, No. 15. – P. 3431 – 3436.
6. Модификация нефтяных дорожных битумов полимерными материалами для получения асфальтобетонных покрытий с повышенными эксплуатационными характеристиками / П. С. Беляев, Д. Л. Полушкин, П. В. Макеев, В. А. Фролов // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2016. – Т. 22, № 2. – С. 264 – 271. doi: 10.17277/vestnik.2016.02.pp.264-271
7. Решение проблемы утилизации полимерных отходов путем их использования в процессе модификации дорожного вяжущего / П. С. Беляев, О. Г. Маликов, С. А. Меркулов [и др.] // *Строит. материалы*. – 2013. – № 10. – С. 38 – 41.
8. Asphalt Modification with Different Polyethylene-Based Polymers / G. Palocco, S. Berlincioni, D. Biondi [et al.] // *European Polymer Journal*. – 2005. – Vol. 41, No. 12. – P. 2831 – 2844. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2005.05.034
9. Thermal and Rheological Properties of Maleated Polypropylene Modified Asphalt / P. H. Yeh, Y. H. Nien, J. H. Chen [et al.] // *Polymer Engineering and Science*. – 2005. – No. 45 (8). – P. 1152 – 1158.
10. Rheological Techniques as a Tool to Analyze Polymer-Bitumen Interactions: Bitumen Modified with Polyethylene and Polyethylene-Based Blends / O. González, J. J. Peña, M. E. Muñoz [et al.] // *Energy & Fuels*. – 2002. – Vol. 16, No. 5. – P. 1256 – 1263.
11. Improving Energy Efficiency of Bitumen Modification with Reclaimed Crumb Rubber / V. P. Belyaev, O. G. Malikov, S. A. Merkulov [et al.] // *Components of Scientific and Technological Progress*. – 2013. – № 1 (16). – P. 75 – 77.
12. EN 12591:2000. Вещества вяжущие битумные и битуминозные. Технические условия на дорожный битум = Bitumen and Bituminous Binders. Specifications for Paving Grade Bitumen / Всероссийский науч.-исслед. ин-т классификации, терминологии и информации по стандартизации и качеству. – М. : [б. и.], 2003. – 25 с.
13. ГОСТ Р 52056–2003. Вяжущие полимерно-битумные дорожные на основе блоксополимеров типа стирол–бутадиен–стирол. Технические условия. – Введ. 2004-01-01. – М. : Стандартинформ, 2007. – 5 с.
14. К вопросу о комплексном решении проблем экологии и качества дорожных покрытий / П. С. Беляев, О. Г. Маликов, С. А. Меркулов [и др.] // *Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского*. – 2012. – Спец. выпуск (39). – С. 184 – 189.

Interaction of the Components of the Modifying Additive in the Process of Producing a Polymeric-Bituminous Binder

V. A. Frolov, P. S. Belyaev, P. V. Makeev, V. P. Belyaev, I. V. Shashkov

*Department of Materials and Technology, polymers@asp.tstu.ru;
TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: bitumen modification; surfactants; polymer-bitumen binder; polyethylene; mixing; thermoplastic elastomer.

Abstract: To obtain polymer-bitumen binders, processes of mixing various modifiers with oil bitumen are used in order to give the binder higher quality indicators compared to the starting material. The problem of searching for compositions of modifiers providing the full range of required indicators of road binders remains relevant. Peculiarities of using modifiers based on thermoelastoplasts and thermoplastics for modifying mixed bitumen are considered. Responses were studied in the form of changes in the quality indicators of a binder when mixing bitumen with different volumes of thermoplastic elastomer and thermoplastic, in the presence or absence of surface-active substances, as well as their mixtures of various compositions. As a result of the research, a mathematical model was developed for the dependence of the characteristics of the polymer-bitumen binder on the content of the components introduced during the mixing process.

References

1. Plewa A., Belyaev P.S., Andrianov K.A., Zubkov A.F., Frolov V.A. The Effect of Modifying Additives on the Consistency and Properties of Bitumen Binders, *Advanced Materials & Technologies*, 2016, no. 4, pp. 35-40, doi: 10.17277/amt.2016.04.pp.035-040 (In Eng., abstract in Russ.)
2. Chen J.S., Liao M.C., Shiah M.S. Asphalt Modified by Styrene-Butadiene-Styrene Triblock Copolymer: Morphology and Model, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2002, no. 14 (3), pp. 224-229.
3. Zhu J., Birgisson B., Kringos N. Polymer Modification of Bitumen: Advances and Challenges, *European Polymer Journal*, 2014, no. 54, pp. 18-38.
4. Lucena M.C.C., Soares S.A., Soares J.B. Characterization and Thermal Behavior of Polymer-Modified Asphalt, *Materials Research*, 2004, no. 7 (4), pp. 529-534.
5. Zhang Y., Zhao S., Li Y., Xie L., Sheng K. Radiation Effects on Styrene-Butadiene-Styrene Copolymer, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2008, vol. 266, no. 15, pp. 3431-3436.
6. Belyaev P.S., Polushkin D.L., Makeev P.V., Frolov V.A. [Modification of oil road bitumen with polymeric materials to produce asphalt concrete pavements with enhanced performance characteristics], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 2, pp. 264-271, doi: 10.17277/vestnik.2016.02.pp.264-271 (In Russ., abstract in Eng.)
7. Belyaev P.S., Malikov O.G., Merkulov S.A., Polushkin D.L., Frolov V.A. [Solving the problem of recycling polymer wastes by using them in the process of modifying road binder], *Stroitel'nyye materialy* [Construction Materials], 2013, no. 10, pp. 38-41. (In Russ.)
8. Polacco G., Berlincioni S., Biondi D., Stastna J., Zanzotto L. Asphalt Modification with Different Polyethylene-Based Polymers, *European Polymer Journal*, 2005, vol. 41, no. 12, pp. 2831-2844, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2005.05.034

9. Yeh P.H., Nien Y.H., Chen J.H., Chen W.C., Chen J.S. Thermal and Rheological Properties of Maleated Polypropylene Modified Asphalt, *Polymer Engineering and Science*, 2005, no. 45 (8), pp. 1152-1158.

10. González O., Peña J.J., Muñoz M.E., Santamaría A., Pérez-Lepe A., Martínez-Boza F., Gallegos C. Rheological Techniques as a Tool to Analyze Polymer-Bitumen Interactions: Bitumen Modified with Polyethylene and Polyethylene-Based Blends, *Energy & Fuels*, 2002, vol. 16, no. 5, pp. 1256-1263.

11. Belyaev V.P., Malikov O.G., Merkulov S.A., Belyaev P.S., Polushkin D.L., Frolov V.A. Improving Energy Efficiency of Bitumen Modification with Reclaimed Crumb Rubber, *Components of Scientific and Technological Progress*, 2013, no. 1 (16), pp. 75-77.

12. EN 12591:2000. Bitumen and Bituminous Binders. Specifications for Paving Grade Bitumen, Moscow: [b. i.], 2003, 25 p. (In Russ.)

13. GOST R 52056–2003. *Vyazhushchiye polimerno-bitumnyye dorozhnyye na osnove bloksopolimerov tipa stirol–butadiyen–stirol. Tekhnicheskiye usloviya* [GOST R 52056–2003. Cementing polymer-bitumen road based on block copolymers of the styrene – butadiene – styrene type. Technical conditions], Moscow: Standartinform, 2007, 5 p. (In Russ.)

14. Belyaev P.S., Malikov O.G., Merkulov S.A., Polushkin D.L., Belyaev V.P. [On the complex solution of environmental problems and the quality of road surfaces], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2012, Special. issue 39, pp. 184-189. (In Russ., abstract in Eng.)

Die Wechselwirkung der Komponenten des modifizierenden Additivs bei der Herstellung eines Polymer-Bitumen-Bindemittels

Zusammenfassung: Für das Erhalten der Polymer-Bitumen-Bindemittel werden die Verfahren des Mischens verschiedener Modifiziermittel mit Ölbitumen verwendet, um dem Bindemittel im Vergleich zum Ausgangsmaterial höhere Qualitätsindikatoren zu geben. Das Problem der Suche nach Modifiziermitteln, die das gesamte Spektrum der erforderlichen Kennziffern für Straßenbindemittel gewährleisten, bleibt aktuell. Es sind die Besonderheiten der Verwendung von Modifiziermitteln auf der Basis von thermoplastischen Elastomeren und Thermoplasten zur Modifizierung von gemischtem Bitumen betrachtet. Die Reaktionen in Form von Änderungen der Qualitätsindikatoren eines Bindemittels beim Mischen von Bitumen mit unterschiedlichen Volumina von Thermoelastoplast und Thermoplast sind in Gegenwart oder Abwesenheit von Tensiden sowie Gemischen verschiedener Zusammensetzungen untersucht. Als Ergebnis der durchgeführten Studien ist ein mathematisches Modell der Abhängigkeit der Eigenschaften des Polymer-Bitumen-Bindemittels vom Inhalt der während des Mischprozesses eingegebenen Komponenten entwickelt.

Interaction des composants de l'additif modificateur dans le processus d'obtention d'un liant polymère-bitume

Résumé: Pour obtenir des liants polymères-bitumineux, on utilise des procédés de mélange de divers modificateurs avec du bitume de pétrole afin de donner au liant des indicateurs de qualité supérieurs à ceux du matériau de départ. Le problème de la recherche des compositions de modificateurs fournissant la gamme complète des indicateurs de liants routiers requis reste actuel. Sont examinées les particularités de

l'utilisation pour la modification du bitume à la base de thermoplastiques et de thermoplastiques. Sont étudiées les réponses sous forme s changements dans les indicateurs de la qualité du liant lors du mélange du bitume de différents volumes de thermoplastique, en présence ou en l'absence de tensioactifs, ainsi que de leurs mélanges de composition différente. À la suite des recherches menées, est élaboré un modèle mathématique de la dépendance des caractéristiques du liant polymère-bitume sur le contenu des composants introduits dans le processus de mélange.

Авторы: *Фролов Виктор Андреевич* – соискатель кафедры «Материалы и технология»; *Беляев Павел Серафимович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Материалы и технология»; *Макеев Павел Владимирович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материалы и технология»; *Беляев Вадим Павлович* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник управления фундаментальных и прикладных исследований; *Шашков Иван Владимирович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Соколов Михаил Владимирович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.