

Исследование эксплуатационных характеристик дорожного битума, модифицированного отходами полиэтилена

Сатаева С.С.*, Абдрахманова А.Г., Курмангалиева А.С.

Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана, Уральск, Казахстан
*E-mail: sataeva_safura@mail.ru

Качество дорожных битумов является одним из важнейших факторов, определяющих срок службы и качество дорожных асфальтобетонных покрытий. Современные тенденции в нефтепереработке и, в частности, все более глубокая переработка нефтяного сырья, требуют учета особенностей его химического состава и структуры для производства дорожных битумов, и, соответственно, их физико-механических свойств. В работе исследован нефтяной дорожный битум марки БНД 70/100 Актауского битумного завода ТОО «Caspi Bitum». Для улучшения эксплуатационных свойств проведено модифицирование дорожного битума полимерными отходами. В качестве пластификатора использовано индустриальное масло марки И-40. Изучены следующие показатели дорожного битума: пенетрация, растяжимость (дуктильность), температура хрупкости, температура размягчения. Показано, что после модифицирования физико-механические свойства битума улучшаются: сокращается глубина проникновения иглы, уменьшается растяжимость, повышается температура размягчения. Изучено влияние полимеров на структуру битумов, эффект их действия в композиции. Проанализированы полимерные отходы в Республике Казахстан. Доказано, что применение в качестве модификатора вторичного полиэтилена является одним из путей решения проблемы, позволяющей переработать запасы вторичного полимерного сырья, при этом решаются проблемы улучшения свойства полимер-битумного вяжущего и экологии.

Ключевые слова: дорожный битум; полимерные отходы; модифицирование; пенетрация; температура размягчения; температура хрупкости; растяжимость.

Полиэтилен қалдықтарымен модифицирленген жол битумының эксплуатациялық қасиеттерін зерттеу

Сатаева С.С.*, Абдрахманова А.Г., Курмангалиева А.С.

Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті, Орал, Қазақстан
*E-mail: sataeva_safura@mail.ru

Жол битумдарының сапасы жолдың асфальтобетон қабаттарының сапасын және қызмет ету мерзімін айқындайтын маңызды факторлардың бірі болып табылады. Мұнай өңдеудегі қазіргі заманғы тенденциялар, соның ішінде мұнай шикізатын терең өңдеу, жол битумдарын өндіруде оның химиялық құрамы мен құрылымының ерекшеліктерін және алынатын битумның физика-механикалық қасиеттерін қарастыруды талап етеді. Жұмыста ЖШС «Caspi Bitum» Ақтау зауытының БНД 70/100 маркалы мұнай жол битумы зерттелді. Жол битумының эксплуатациялық қасиеттерін жақсарту үшін полимерлік қалдықтармен түрлендіру жүргізілді. Пластификатор ретінде И-40 маркалы индустриалдық май қолданылды. Жол битумының келесі көрсеткіштері зерттелді: пенетрациясы, созылғыштығы (дуктильдігі), сынғыштық температурасы және жұмсарту температурасы. Модифицирлеуден кейін битумның физикалық-механикалық қасиеттері жақсарғандығы байқалады: иненің ену тереңдігі қысқарады, созылғыштығы азаяды, жұмсарту температурасы артады. Сондай-ақ полимерлердің битум құрылымына және олардың композиттерге әсер ету эффектісі зерттелді. Қазақстан Республикасындағы полимерлік қалдықтар талданды. Екіншілік полимерлік шикізат қорын қайта өңдеуге мүмкіндік беретін екіншілік полиэтиленді модификатор ретінде қолдану тиімді екені дәлелденді, бұл ретте полимер-битум тұтқырғыш қасиеттері мен экология мәселелері шешіледі.

Түйін сөздер: жол битум; полимерлік қалдықтар; түрлендіру; пенетрация; жұмсарту температурасы; мөрт сынғыштық температурасы; созылғыштық.

Study of performance properties of an asphalt modified with polyethylene waste

Satayeva S.S.*, Abdрахmanova A.G., Kurmangaliyeva A.S.

Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian and Technical University, Uralsk, Kazakhstan
*E-mail: sataeva_safura@mail.ru

The quality of road bitumen is one of the most important factors determining the service life and quality of road asphalt concrete pavements. Current trends in oil refining and, in particular, increasingly deeper processing of crude oil, require consideration of the characteristics of its chemical composition and structure for the production of road bitumen, and, accordingly, the physical and mechanical properties of the bitumen produced.

In this study the BOR 70/100 oil asphalt from the Aktau Bitumen Factory LLP "CaspiBitum" was considered. An asphalt was modified with polymer waste to upgrade operating properties. The I-40 industrial oil was used as a softener. Indicators like penetration, extensibility (ductility), brittleness temperature and softening temperature of bitumen were explored in this study. It was shown, that physical-mechanical properties of bitumen increased after modification: needle penetration depth decreased, extensibility decreased, softening temperature increased. Also, the influence of polymers on the structure of bitumen and the effect of their action in the composition were examined. Structure of polymer waste in Republic of Kazakhstan was analyzed. It was proved, that the usage of the recycled polyethylene as a modifier is a rational approach, and it lets to recycle stocks of secondary polymeric materials. Also problems of improving the properties of polymer-bitumen binder and ecology solved.

Keywords: asphalt; polymer waste; modification; penetration; brittleness temperature; softening temperature; extensibility.



Исследование эксплуатационных характеристик дорожного битума, модифицированного отходами полиэтилена

Сатаева С.С.*, Абдрахманова А.Г., Курмангалиева А.С.

Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана, Уральск, Казахстан

*E-mail: sataeva_safura@mail.ru

1. Введение

В связи с ежегодным увеличением количества автотранспорта, объемов перевозок пассажиров и грузов нагрузка на покрытие из асфальтобетона постоянно возрастает. Это приводит к более быстрому разрушению дороги. Так как в настоящее время темпы строительства автомобильных дорог сдерживаются высокой стоимостью или отсутствием необходимых дорожно-строительных материалов, то неременным условием повышения эффективности дорожного строительства является повышение качества дорожно-строительных материалов. Одним из перспективных направлений улучшения качества дорожных покрытий является использование различных добавок при изготовлении асфальтобетонных покрытий, к числу которых относятся отходы полимеров.

Практика эксплуатации автомобильных дорог РК показывает, что долговечность асфальтобетонных покрытий на них значительно ниже нормативных сроков. Поэтому поддержание автомобильных дорог в состоянии, соответствующем требованиям транспортных потоков невозможно без применения новых, прогрессивных материалов и технологий. Основным фактором, влияющим на резкое снижение сроков службы дорожных покрытий, является применение в асфальтобетонных смесях в качестве вяжущего, битума низкого качества, так как микротрещины развиваются преимущественно в его пленке.

Несмотря на широкое применение нефтяного битума в дорожном строительстве спрос на битумы полностью не удовлетворяется, т.к. качество многих битумных

материалов не полностью соответствуют современным требованиям строительной отрасли. Эксплуатационные свойства битума под влиянием агрессивной окружающей среды ухудшаются и не всегда могут отвечать желаемым качественным требованиям. Улучшения свойств битума можно достичь введением наполнителей, поверхностно-активных веществ и различных модификаторов, в частности полимерных отходов [1].

Доля полимерных отходов в Казахстане, России и США представлена на рисунке 1.

Население РК на сегодняшний день составляет 18 млн. человек. Твердых бытовых отходов (ТБО) на одного человека ежегодно приходится 353 кг. Из них 15% – полимерные отходы по сравнению с Россией и США, где на отходы из полимеров приходится 6% и 8%, соответственно [2].

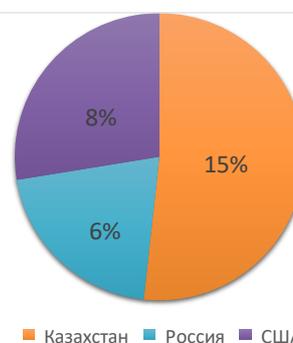


Рисунок 1 – Доля полимерных отходов в Казахстане, России и США

К примеру, город с населением 100000 человек каждый месяц выбрасывает около 20 тонн пластиковых полиэтиленовых бутылок, причем этот объем, с каждым годом, растет в геометрической прогрессии. Поэтому, именно вторичная переработка спасает население от экологической катастрофы.

Существует множество способов модифицирования битумов с использованием различных полимеров и получения полимер-битумного вяжущего с повышенными эксплуатационными свойствами.

Битум, модифицированный полимерами и их отходами, отличается высокой устойчивостью к пластическим деформациям в жаркое время и ощутимой устойчивостью к трещинообразованию при отрицательных температурах. Степень улучшения этих свойств зависит от количества и состава полимера, вводимого в состав битума. Модифицирование битума полимерами позволяет улучшить тепло-, морозостойкость, химическую устойчивость, пластичность и эластичность композиционных покрытий [3].

Использованию полимеров в качестве добавки при получении асфальтобетонных смесей посвящены ряд работ российских ученых.

Так в работе [4] проведены исследования по влиянию стадийности технологического процесса приготовления резинобитумного вяжущего на физико-химические свойства. Поставлен эксперимент, в ходе которого сравнивали процесс приготовления вяжущего при различных технологических параметрах. Установлено, что оптимально приготавливать композиционное резинобитумное вяжущее в две стадии с предварительным получением концентрированной суспензии резинобитумного композита. При заданном режиме термомеханического воздействия вяжущее обладает наилучшими физико-химическими свойствами.

Авторами работы [5] изучены свойства полимерно-битумных композиций, содержащих 1,2-полибутадиены, отличающиеся по молекулярной массе и строению макромолекул. Показано, что введение 1,2-полибутадиена в состав битума приводит к заметному улучшению основных эксплуатационных свойств и расширению температурного интервала работоспособности битумного вяжущего. Полимерно-битумные композиции на основе 1,2-полибутадиенов рекомендованы для практического использования в автодорожном строительстве в качестве альтернативы применяемому в настоящее время дивинилстирольному термоэластопласту.

Не менее интересной следует отметить работу [6], где исследованы нефтяные битумы, модифицированные полимерными материалами. В качестве полимерных материалов использованы отходы полиэтилена и термоэластопласт ДСТ-30-01. Для улучшения адгезионных свойств получаемого полимер-битумного вяжущего с минеральными наполнителями использована адгезионная

добавка «Амдор-10». Установлено, что введение в асфальтобетон полученного полимер-битумного вяжущего способствует улучшению его физико-механических характеристик. Использование отходов термопласта обеспечивает снижение себестоимости полимер-битумного вяжущего по сравнению с аналогами.

Известны работы [7,8] по модифицированию нефтяных битумов полимерными материалами, в целях улучшения качественных показателей получаемого дорожного вяжущего. Установлено, что введение в асфальтобетон полученного полимер-битумного вяжущего способствует улучшению его физико-механических характеристик.

Для решения вопроса о применении вторичного (постаревшего) полиэтилена в асфальтобетонных смесях Г.А.Бонченко [9] были проведены экспериментальные исследования физико-механических свойств полиэтилена низкой плотности (пленка сельскохозяйственного назначения, бывшая в употреблении 6-8 месяцев) и полиэтилена высокой плотности (упаковочный материал и тара). Автором приведены результаты исследований показывающие, что вторичный полиэтилен сохраняет прочностные и деформационные свойства и может использоваться в качестве модифицирующей добавки для получения полиэтилен-битумных композиций. Показаны преимущества дорожных покрытий из асфальтобетона, модифицированного полиэтиленом, и технология его производства.

Анализ литературы показывает, что применение полимерных отходов в качестве модификатора битума позволяет повысить его физико-механические свойства, улучшить адгезию с минеральными компонентами, повысить прочность, деформационную устойчивость, морозостойкость, водоустойчивость дорожной конструкции.

Однако, работы по использованию в качестве добавок отходов полимерных материалов в РК мало изучены. В то время как асфальтобетонные смеси с добавкой полимеров улучшают физико-механические свойства дорожного асфальтобетона, повышают трещиностойкость при пониженных температурах и сдвигустойчивость при повышенных температурах. Поэтому исследования в области улучшения физико-механических свойств дорожного битума с использованием отходов полимеров до настоящего времени являются актуальными.

В связи с вышеизложенным целью настоящей работы является повышение эксплуатационных характеристик нефтяного дорожного битума марки БНД 70/100 путем модифицирования его отходами полиэтилена.

2. Эксперимент

Для исследования были использованы следующие материалы: нефтяной дорожный битум марки БНД 70/100 Актауского битумного завода (ТОО «Caspi Bitum»), вторичный полиэтилен (ПЭ) и индустриальное масло И-40. Нефтяной дорожный битум – это крупнотоннажный

продукт нефтепереработки, который обладает комплексом ценных технических свойств и широко используется в дорожном строительстве. В таблице 1 представлены физико-химические свойства данного битума.

Таблица 1 – Физико-химические свойства БНД 70/100

Показатель	Значение
Глубина проникновения иглы, 0,1 мм	
- при 25 °С	70
- при 0 °С	22
Температура размягчения по кольцу и шару, °С	49
Растяжимость при 25 °С, см	71
Температура хрупкости, °С	-21

В качестве модификатора дорожного битума использовали вторичный полиэтилен (ПЭ). Использование вторичного сырья в качестве новой ресурсной базы – одно из наиболее развивающихся направлений переработки полимерных материалов в мире. Следует отметить, что утилизация отработанных полимерных материалов является важной экологической проблемой. В мировой тенденции дорожного строительства уже много лет используются полимерные модификаторы, улучшающие свойства дорожного битума. Как указывалось выше, при модифицировании битума полимерами получают полимер-битумное вяжущее (ПБВ) с улучшенными эксплуатационными свойствами. При использовании же вторичных полимерных материалов в качестве добавок

для битума можно решить сразу несколько проблем: экологическую обстановку, улучшение качества и увеличения срока службы ПБВ.

В данной работе ПЭ является отходом производства цеха полиэтиленовых труб АО «Уральская торгово-промышленная компания». Для изготовления труб применяется полиэтилен высокой плотности марки ПЭ-100. В цехе отходы подвергают вторичной переработке (на экструдере) в однородный материал либо в виде гранул, либо в виде хлопьев. Результаты исследований, проведенных в цеховой лаборатории, приведены в таблице 2, из которой следует, что вторичный полиэтилен сохраняет достаточно высокие прочностные и деформационные показатели и может использоваться в качестве модифицирующей добавки к битумам.

В качестве пластификатора применяли индустриальное масло И-40. Масло И-40 относится к классу продуктов общего применения и служит для использования в агрегатах разных отраслей применения и технического оснащения. Также применяется как пластификатор в приготовлении полимер-битумных вяжущих. Пластификатор уменьшает время смешения битума с полимером, повышает вязкость и улучшает свойства получаемого ПБВ. В таблице 3 представлены физико-химические свойства индустриального масла И-40.

Для оценки влияния данного пластификатора на показатели свойств битума и определения необходимого его количества для разжижения вяжущего пластификатор вводили в количестве от 0 до 4%, дальнейшее увеличение было не целесообразно с экономической точки зрения. Затем определяли температуры размягчения и хрупкости битума. Полученные данные представлены на рисунке 2.

Таблица 2 – Физико-химические свойства первичного и вторичного ПЭ

Показатель	Первичный полиэтилен	Вторичный полиэтилен
Прочность при растяжении, МПа	22-45	10
Относительное удлинение при разрыве, %	300-500	220
Морозостойкость, °С	-70 и ниже	-40
Температура плавления, °С	130-135	110
Температура декструкции, °С	325	320

Таблица 3 – Характеристики масла И-40 по ГОСТ 20799-88

Наименование показателя	Единицы измерения	И-40
Плотность при 20°С	кг/м ³	883,1
Вязкость кинематическая при 40°С	мм ² /с	65,9
Температура вспышки в открытом тигле	°С	236
Температура застывания	°С	-16
Кислотное число	мг КОН/1 г	0,006
Зольность	%	0,005

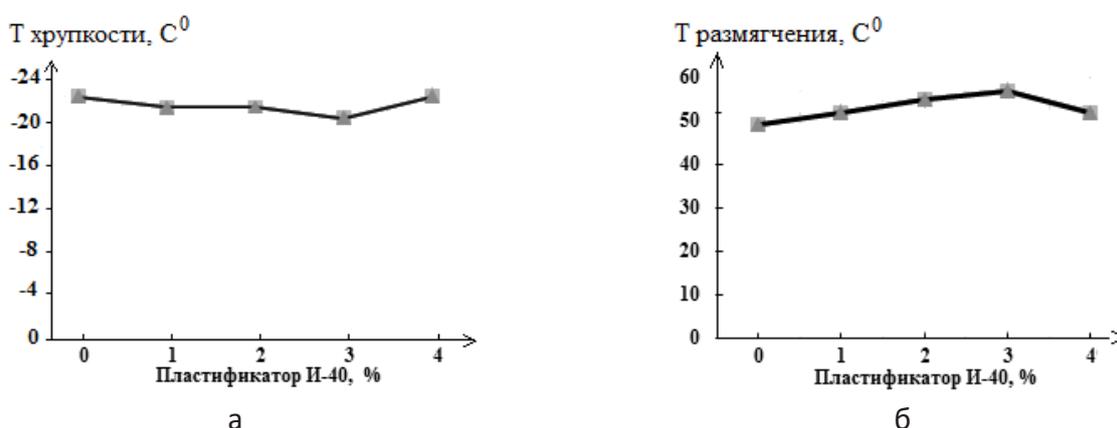


Рисунок 2 – Зависимость температуры размягчения (а) и температуры хрупкости (б) от содержания пластификатора

Как видно из рисунка 2 пластификатор И-40 показал наилучший эффект при содержании 3%. Установленная концентрация пластификатора была использована для дальнейшего подбора состава ПБВ.

Методика приготовления ПБВ

ПБВ готовят в металлической цилиндрической емкости-смесителе объемом не менее 0,5 л лабораторной установки. Теплота к емкости-смесителю подводится при помощи электроплитки с использованием песчаной бани. Температура в смесителе контролируется термометром. Перемешивание компонентов ПБВ производится при помощи механической лопастной мешалки, число оборотов которой регулируется при помощи лабораторного трансформатора.

Необходимое количество битума загружают в металлическую емкость, добавляют определенное количество пластификатора, затем включают обогрев и перемешивают до однородного состояния. При 150-160°C в расплавленный битум вводят по порциям вторичный ПЭ. Сначала смесь перемешивают (желательно медленно) до полного смачивания и равномерного распределения полимера. Затем начинают интенсивное перемешивание смеси с одновременным постепенным нагревом до 190-200°C. Смешение проводят в течение 30-40 мин [10].

Изменение свойств полимер-битумного вяжущего изучали при различных концентрациях полимера: 1, 2, 3, 4% от массы битума (таблица 4).

В процессе модифицирования битума создается межмолекулярная сила сцепления структурных элементов в дисперсионной среде. Механизм совмещения проходит при повышенных температурах при постоянном перемешивании, с последующим образованием гомогенной системы. Важным фактором является структурная стабильность ПБВ, предотвращающее дальнейшее расслоение битума и полимера [11].

3. Результаты и обсуждение

Исследованы физико-химические показатели ПБВ: глубина проникновения иглы, температура размягчения по кольцу и шару (КиШ), растяжимость при 25°C, температура хрупкости. В таблице 5 представлены результаты исследований физико-химических показателей дорожного битума и ПБВ.

Как видно из таблицы 5 использование полимерной композиции приводит к улучшению сопротивления к постоянным нагрузкам при повышенной температуре, что объясняется наличием полимерной сетки, повышенной устойчивости к образованию трещин при существенном понижении температурного режима, повышенной устойчивости к старению, температуроустойчивости, твердости и эластичности.

Проведенные исследования показали, что варьируя содержание вторичного полимера можно добиться

Таблица 4 – Компоненты смеси модифицированного битума на основе ПЭ

Материалы	№ образца			
	1	2	3	4
БНД 70/100, г	300	300	300	300
Вторичный ПЭ, г	3	6	9	12
И-40, г	9	9	9	9

требуемых эксплуатационных свойств битума. А использование пластификатора, кроме указанных выше показателей, улучшает пластичные и прочностные свойства битума.

Из анализа результатов исследований свойств дорожного битума и ПБВ видно, что использование полимерной композиции приводит к значительному улучшению большинства показателей. В частности, глубина проникновения иглы, при 25°C уменьшается на 10 мм. Значительно снижается растяжимость при 25°C – с 71 до 19 см. Температура размягчения по КиШ увеличилась от 49 до 59°C, тем самым снижается склонность битума к деформации. Температура хрупкости находится в пределах нормы.

По твердости наилучшими характеристиками обладают битумные вяжущие с содержанием полимера 3%. Пенетрация, или глубина проникновения иглы, косвенно характеризует степень твердости битумов.

По температуре размягчения битумного вяжущего оптимальными являются образцы, содержащие также до 3% полимера, так как при дальнейшем увеличении замечен лишь незначительный рост.

Растяжимость при 25°C уменьшается при добавлении до 3% полимерных добавок, затем наблюдается его увеличение.

По совокупности физико-химических и эксплуатационных характеристик приходим к выводу, что для битумных вяжущих с содержанием полиэтилена 2,5-3% достигается наиболее оптимальное соотношение всех показателей.

Таким образом, на основе полученных результатов можно сделать вывод, что улучшение эксплуатационных свойств битума происходит при добавлении уже 1% полимерных модификаторов из вторичного ПЭ. Но максимальный результат для полимер-битумных вяжущих достигается при добавлении 3% вторичного полиэтилена и 3% пластификатора.

Таблица 5 – Физико-химические свойства битума, модифицированного ПЭ

Показатель	Значение				
	0	1	2	3	4
Количество модификатора, %	0	1	2	3	4
Глубина проникновения иглы, 0,1 мм:					
при 25°C	70	67	64	61	65
при 0°C	22	24	23	23	23
Растяжимость при 25 °С, см	71	47	27	19	49
Температура размягчения по КиШ, °С	49	51	55	59	57
Температура хрупкости, °С	-21	-21	-21	-20	-22

4. Заключение

В работе изучены физико-химические свойства дорожного битума марки БНД 70/100 до и после модифицирования полимерными отходами. Показано влияние полимерной добавки на его эксплуатационные свойства. Установлено, что использование в качестве модификатора битума полимерных отходов, позволит решить экологическую проблему засорения окружающей среды этими отходами. Так как выброшенные на свалки либо закопанные одноразовая посуда, пищевые пленки разлагаются в естественных условиях не менее 100 лет. Их контакт с дождевыми осадками и грунтовыми водами сопровождается вымыванием ряда токсичных

органических соединений (дифениламин, дибутилфталат, фенантрен), огнеопасны (в случае возгорания, погасить их достаточно сложно), при складировании они являются местом размножения грызунов, кровососущих насекомых и служат источником инфекционных заболеваний.

Благодарности

Выражаем благодарность за оказанную поддержку в проведении исследований в рамках магистерской диссертации на тему «Использование полимерных отходов в переработке тяжелых нефтяных остатков» коллективу и руководству ТОО «БатысЖолЛаборатория» г. Уральск, Казахстан.

Список литературы

- 1 Юсупов А.И., Абдуллин А.И., Емельяничева Е.А. Дорожный битумный композиционный материал с улучшенными характеристиками // Вестник технологического университета. – 2012. – Т.15, №12. – С.205-207.
- 2 Бадыхан Е. Операция «Утилизация». Как в Казахстане решить проблему отходов // Интернет-газета «Караван». – 2017. – 22

- мая. Интернет-ресурс: <https://www.caravan.kz/gazeta/operaciya-utilizaciya-kak-v-kazahstane-reshit-problemu-otkhodov-395062/>
- 3 Вольфсон С.И., Хакимуллин Ю.Н., Закирова Л.Ю., Хусаинов А.Д., Вольфсон И.С., Макаров Д.Б., Хозин В.Г. Модификация битумов, как способ повышения их эксплуатационных свойств // Вестник технологического университета. Химическая технология. – 2016. – Т.19, №17. – С.29-33.
 - 4 Иванов С.А., Шаббаев С.Н. Исследование влияния стадийности технологического процесса получения композиционных резинобитумных вяжущих на их свойства // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – №4. – С.153-158.
 - 5 Глазырин А.Б., Кинзибаев Д.Р., Абдуллин М.И. Битумные композиции, модифицированные 1,2-полибутадиенами // Вестник Башкирского университета. – 2015. – Т.20, №4. – С.1193-1197.
 - 6 Беляев П.С., Полушкин Д.Л., Макеев П.В. Модификация нефтяных битумов полимерными материалами для получения асфальтобетонных покрытий с повышенными эксплуатационными характеристиками // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2016. – Т.22, №2. – С.264-271.
 - 7 Калгин Ю.И. Дорожные битумоминеральные материалы на основе модифицированных битумов: монография / Ю.И. Калгин. Воронеж. гос. архитектурно-строит. ун-т. – Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та. – 2006. – 272 с.
 - 8 Беляев П.С. Решение проблемы утилизации полимерных отходов путем использования их в процессе модификации дорожного вяжущего // Строительные материалы. – 2013. – №10. – С.38-41.
 - 9 Бонченко Г.А. Асфальтобетон. Сдвигустойчивость и технология модифицирования полимером / Г.А. Бонченко. – М.: Машиностроение, 1994. – 176 с.
 - 10 Галдина В.Д. Модифицированные битумы / Учеб. пособие. – Омск: СибАДИ. – 2009. – 230 с.
 - 11 Хозин В.Г. и др. Модификация нефтяных битумов полимерами // Материалы V Академических чтений РААСН. – Воронеж, Россия. – 1999. – С.508-510.

References

- 1 Yusupov AI, Abdullin AI, Emelyanisheva EA (2012) Bulletin of Technology University [Vestnik tekhnologicheskogo universiteta] 12:205-207. (In Russian)
- 2 Badyhan E (2017) Operation «Recycling». How to solve the problem of waste in Kazakhstan [Operatsiya «Utilizatsiya». Kak v Kazakhstane reshit' problemu otkhodov]. Internet newspaper "Karavan", 22 May. Web-Page: <https://www.caravan.kz/gazeta/operaciya-utilizaciya-kak-v-kazahstane-reshit-problemu-otkhodov-395062/>. (In Russian)
- 3 Wolfson SI, Khakimullin YN, Zakirova LYu, Khusainov AD, Wolfson IS, et al (2016) Bulletin of Technology University [Vestnik tekhnologicheskogo universiteta] 19:29-33. (In Russian)
- 4 Ivanov SA, Shabaev SN (2016) Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Building [Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta] 4:153-158. (In Russian)
- 5 Glazyrin AB, Kinzibayev DR, Abdullin MI (2015) Bulletin of the Bashkir University [Vestnik Bashkirskogo universiteta] 4:193-197. (In Russian)
- 6 Belyaev PS, Polushkin DL, Makeev PV (2016) Bulletin of Tambov State Technical University [Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta] 2:264-271. (In Russian)
- 7 Kalgin YI (2006) Road bitumen mineral materials based on modified bitumen [Dorozhnyye bitumomineral'nyye materialy na osnove modifitsirovannykh bitumov]. Voronezh State University, Voronezh, Russia. (In Russian)
- 8 Belyaev PS (2013) Building Materials [Stroitel'nyye materialy] 10:38-41. (In Russian)
- 9 Bonchenko GA (1994). Asphalt concrete. Shear stability and polymer modification technology [Asfal'tobeton. Sdvigoustoychivost' i tekhnologiya modifitsirovaniya polimerom]. Mashinostroyeniye, Moscow, Russia. (In Russian)
- 10 Galdina VD (2009) Modified Bitumens [Modifitsirovannyye bitумы]. SibADI, Omsk, Russia. (In Russian)
- 11 Khozin VG, et al (1999) Proceedings of the V Academic Readings of the RAACS [Materialy V Akademicheskikh chteniy RAASN]