

Разработка и исследование композиций, содержащих полимеры и твердые углеродистые материалы

Е.И. Иманбаев^{1*}, Е.К. Онгарбаев^{1,2}, А.Б. Жамболова¹, Е. Тилеуберди¹,
Е. Канжаркан³, А.Р. Кенжегалиева¹, А.Н. Кыдырали², Д. Мукталы¹

¹Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан

²Казахский национальный университет имени аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан

³Казахский национальный педагогический университет имени Абая, пр. Достык, 13, Алматы, Казахстан

Информация о статье

Получено
07.08.2025

Получено в исправленном виде
17.09.2025

Принято
25.09.2025

Ключевые слова:

битум; модификация; кокс;
механохимическая обработка;
полимерные отходы;
полимерно-битумные
вяжущие; модификаторы

АННОТАЦИЯ

Применение бытовых полимерных отходов в модифицировании битумов является одним из перспективных направлений, позволяющих обеспечить дорожному покрытию высокую устойчивость к усталостным разрушениям, колебаниям температур суточных и сезонных циклов, способствующих решению экологических проблем. Кроме того, использование полимерных отходов в качестве модификатора способствует решению проблемы повышенной стоимости битума, модифицированного полимерами. В данной работе изучены составы и физико-химические характеристики битумов, полимерно-битумных вяжущих и угольного кокса. Химический состав каменноугольного кокса исследован методами ИК-спектроскопии и термогравиметрического анализа. Добавление микродиспергированного кокса при модификации битумов улучшает характеристики получаемого продукта, сопоставимые с полимерно-битумными вяжущими. Полимерно-битумное вяжущее с добавлением полимерного отхода и модификатора Elvaloy по основным показателям соответствует требованиям СТ РК 2534-2014 для марки БМП 50/70. В процессе модифицирования битумов полимерными отходами полимерные частицы физически взаимодействуют с высокомолекулярными компонентами (асфальтены, смолы и полиароматические соединения), что приводит к увеличению температуры размягчения, уменьшению значений пенетрации и растяжимости. Добавка микродиспергированного гранулированного порошка кокса при модифицировании дорожного битума обеспечивает соответствие требованиям ПБВ 40 по ГОСТ Р 52056-2003.

1. Введение

Ежегодно в мире производится 100 миллионов тонн битума, при этом порядка 90% используется в дорожном строительстве [1]. Эксплуатационные характеристики дорожного покрытия повышаются за счет использования модифицированных битумов. Добавление модификаторов в битум или асфальтобетон улучшает долговечность дорожного покрытия, адгезию асфальтобетона к заполнителю, устойчивость к деформациям при большой нагрузке и холоду. В настоящее время для увеличения устойчивости к колебаниям температуры применяется щебеночно-мастичный асфальтобетон. Улучшенные эксплуатационные

характеристики данного вида асфальтобетонной смеси обеспечиваются за счет повышенного содержания битума – до 8%. При повышенном содержании битума в асфальтобетонной смеси проблемой становится его стекание с поверхности минерального материала. Для предотвращения этого процесса используются специальные стабилизирующие добавки. Углеродные материалы относятся к наиболее перспективным для получения стабилизирующих добавок к щебеночно-мастичным асфальтобетонам [2-5].

В работах [6, 7] показана возможность использования нецелевых фракций и высокосернистых коксов в качестве добавок при производстве асфальтобетонных смесей. По природе кокс обла-

*Corresponding author: Y.I. Imanbayev; E-mail address: erzhan.imanbayev@gmail.com

дает высокой адсорбционной способностью и использование порошка кокса в качестве адсорбента является перспективным направлением [8-11]. Установлено, что нефтяной кокс является высокомолекулярным пространственно-сшитым металлодержащим полидисперсным полимером, обладающим наилучшими свойствами среди альтернативных видов топлив, поэтому использование его в качестве добавки к битумным материалам и асфальтобетонным смесям предполагает повышение некоторых характеристик. Карбены в составе кокса являются высокомолекулярными веществами с молекулярной массой примерно 100000-135000 а.е.м., а другие высокомолекулярные карбоиды являются сшитым трехмерным полимером, значительная часть атомов углерода которых занята в конденсированных ароматических структурах. Добавление этих соединений в битумное вяжущее обеспечивает высокую прочность на растяжение. Образовавшиеся связи между жесткими блоками сшитого полимера и полидисперсной системы в битуме при высоких температурах с повышением подвижности макромолекул не разрушаются, позволяя сшитому полимеру необратимо деформироваться в пространственную структуру битумного вяжущего, чем объясняется уменьшение стекания битумного вяжущего в образцах, содержащих в составе нефтяной кокс.

В работах [12-15] приводится использование каменноугольного пека в качестве углеродистого материала для улучшения свойств нефтяных битумов из-за высокого содержания в них асфальтенов. Каменноугольный пек представляет собой остаток перегонки каменноугольной смолы, полученный после карбонизации угля. По сравнению с нефтяным пеком каменноугольный пек характеризуется более высокой проницаемостью, смачиваемостью и прочным сцеплением с минеральным наполнителем [16]. В этой связи каменноугольный пек вызывает интерес использования его в качестве модификатора битумов, так как активные компоненты с гетероэлементами S, N и O могут привести к химическому сшиванию и физическому набуханию между каменноугольным пеком и битумом [17-19].

Остаток прямого сжижения угля содержит большое количество непрореагировавшего угля, минералов и других компонентов, включая высокоценную и большую часть тяжелой нефти, асфальтенов и преасфальтенов [20-22]. Использование остатка прямого сжижения угля в качестве модификатора для битумного вяжущего не

только значительно снижает стоимость модифицированного битума, но и способствует решению проблем экологии, связанных с утилизацией этих отходов.

В работе [23] показано, что добавление 7% остатка прямого сжижения угля обеспечивает соответствие модифицированного битумного вяжущего требованиям ASTM D5710-95 для материалов с пенетрацией 40-55.

В работе [24] установлено, что остатки прямого сжижения угля в качестве модификатора битумов могут образовывать стабильную структуру дисперсной полярной жидкости, что приводит к улучшению качества получаемого битумного вяжущего.

В работах [25, 26] проведены макро- и микроиспытания свойств модифицированного битумного вяжущего с остатками прямого сжижения угля и установлено, что такие материалы обладают высокой устойчивостью к деформациям при высоких температурах, но низкотемпературные свойства ухудшаются.

Для модифицирования битумов и асфальтобетонов используются наноматериалы, в частности, углеродные нанотрубки и фуллерены, обладающие уникальными физико-химическими свойствами, позволяющие целенаправленно формировать состав и структуру дорожно-строительных композиционных материалов.

В работе [27] показано, что при традиционном типе нагрева модифицирования битума нановолокнистым углеродом происходит неравномерное смешивание, а микроволновой тип нагрева приводит к однородному смешиванию. Установлено, что при увеличении количества нановолокнистого углерода с 5 до 25% значение пенетрации уменьшается, что может быть связано с его интеркаляцией между слоями битума. Таким образом, исследование показало, что нановолокнистый углерод выступил в качестве хорошего модификатора битума, а микроволновое смешивание оказалось более результативным с точки зрения стабильности, однородности и физических свойств.

В работе [28] показано, что добавлении 5% наноксида алюминия в полимерно-битумные вяжущие значительно улучшает показатели пенетрации, упругого восстановления и остаточной деформации (RV). Увеличение содержания наноксида алюминия снижает разницу в плотности между фазами СБС и битума, что приводит к значительному улучшению термостойкости при высоких температурах. При содержании 5% нано-

оксида алюминия достигается улучшение на 62%. Нанооксид алюминия улучшил высокотемпературные характеристики полимерно-битумных вяжущих с низким содержанием СБС по параметру колееобразования *Supergrave*. Модифицированный битум наноматериалами превысил пределы стандартов во всех температурных условиях испытаний и показал повышенную усталостную прочность. Оптимальное содержание нанооксида алюминия для сопротивления к колееобразованию составило 3%. Добавление модификатора инициирует специфический физико-химический процесс преобразования поверхностной энергии наноразмерных частиц, что приводит к упорядочению и упрочнению битумной матрицы [28].

Тонкое измельчение и закрепление на поверхности минерального материала – достаточно сложная задача: полимерные материалы слишком пластичны, плохо поддаются измельчению и, кроме того, полимеры, растворимые в битуме, обладают низкой адгезией к минеральным материалам. В статье [29] предложено модифицировать полимерно-битумные вяжущие порошком яичной скорлупы как в микро-, так и в наноразмере. Добавка приводит к повышению твердости, когезии и эластичности битума за счет снижения пенетрации и повышения температуры размягчения и вязкости. Установлено, что пластичность и потеря массы уменьшаются при увеличении содержания яичной скорлупы как в микро-, так и в наноразмере. При добавлении наноразмерной яичной скорлупы достигается равномерная дисперсия в битумной матрице, обеспечивающая стабильность и однородность в условиях высоких температур. Введение яичной скорлупы как в микро-, так и в наноразмере в битум приводит к увеличению фактора колеености $G^*/\sin\delta$, причем наноразмерная добавка продемонстрировала высокие показатели. Выявлено, что наиболее эффективным содержанием наноразмерной яичной скорлупы является 9%, при котором происходит улучшение физических и реологических свойств битума.

В работе [30] показано, что введение масла рисовых отрубей в битум снижает предел прочности на сдвиг из-за более низкой молекулярной массы масла, что приводит к снижению вязкости на 36%. Добавление нано-СаО к биобитуму увеличивает вязкость и усиливает связь между молекулами биобитума при высоких температурах, тем самым повышая предел прочности на сдвиг. Согласно результатам DSR, показатель колеености ($G^*/\sin\delta$) улучшается как в исходных, так и в

кратковременно выдержанных условиях при добавлении нано-СаО к биобитуму. Верхний предел PG битума, содержащего масло рисовых отрубей, снижается с PG-64 до PG-58, но с добавлением нано-СаО увеличивается до PG-70. Кроме того, нано-СаО в биобитуме снижает индекс реологического старения, создавая барьер, который ограничивает теплопередачу и уменьшает испарение более легких компонентов. Таким образом, эффективное сочетание масла рисовых отрубей и нано-СаО обеспечивает снижение чувствительности к нагрузкам и улучшает эксплуатационные свойства дорожного покрытия при высоких температурах.

Аль-Джумайли [31] исследовал модификацию битума с использованием ПЭТ, резиновой крошки и отработанного моторного масла. В результате исследования установлено увеличение стабильности образца по Маршаллу при содержании 9% резиновой крошки, 12% ПЭТ и 5% отработанного моторного масла.

В исследовании [32] сравнены усталостные свойства битума, модифицированного СБС и ПЭТ, и было обнаружено, что оба модификатора способствуют их улучшению. Согласно работе [33], усталостное поведение битумов пропорционально поверхностной энергии: чем больше поверхностная энергия, тем выше усталостная долговечность. Установлено, что поверхностная энергия вяжущего, модифицированного СБС, выше, чем у чистого битума, следовательно, это приведет к увеличению усталостной долговечности. В этом же исследовании отмечено, что битум, модифицированный ПЭТ-полимером при содержании 6%, характеризуется высокими усталостными свойствами и низким уровнем деформации [34].

В работе [35] изучено мокрое смешивание ПЭТ с битумом и установлено, что постоянные деформации полученного образца значительно улучшились. Высокое содержание ПЭТ в составе битума обеспечивает наилучшую устойчивость к постоянной деформации.

В состав щебеночно-мастичного асфальтобетона вводят стабилизирующие добавки – искусственные волокна, предотвращающие стекание битума с поверхности минерального материала. Волокнистые соединения распределяются по объему битумного связующего, затем образуют сетчатую структуру, предотвращая процесс стекания во время транспортировки, хранения. Тонкое измельчение и закрепление на поверхности минерального материала – достаточно сложная задача: полимерные материалы слишком пластич-

ны, плохо поддаются измельчению и, кроме того, полимеры, растворимые в битуме, обладают низкой адгезией к минеральным материалам. В этой связи основной задачей данной работы является модифицирование полимерно-битумных вяжущих (ПБВ) углеродными материалами, которые эффективно связываются не только с полимерами, но и с поверхностью минеральных компонентов. Цель работы – разработать композиционные материалы, включающие полимеры и твердые углеродистые материалы.

Предложены новые составы ПБВ, содержащие в качестве модификатов: от 1 до 3 мас.% вторичных полимерных отходов на основе полиэтилен-терефталата, от 0,5 до 1 мас.% микродиспергированного гранулированного порошка кокса и от 1 до 3 мас.% модификаторов типа СБС (стирол-бу-

тадиен-стирол) или Elvaloy от массы битума. Использование указанных компонентов позволяет одновременно снизить себестоимость готовой продукции и решить задачу утилизации твердых отходов.

2. Материалы и методы исследования

Образцы нефтяного дорожного битума марки БНД 70/100 были представлены Актауским битумным заводом ТОО «СП CaspiBitum». В табл. 1 представлены физико-механические характеристики битума марки БНД 70/100.

Использовались образцы кокса, полученные из каменного угля месторождения Шубаркол, физико-химические характеристики которых показаны в табл. 2.

Таблица 1. Физико-механические характеристики битума

Наименование показателя	БНД 70/100	СТ РК 1373-2013
Пенетрация при 25 °С, 0,1 мм	83	71-100
Температура размягчения по КиШ, °С	47	не ниже 45
Растяжимость при 25 °С, см	>150	не менее 75
Динамическая вязкость при 60 °С, Па·с	250	не менее 145
Динамическая вязкость при 135 °С, мм ² /с	547	не менее 250
Температура вспышки, °С	274	не ниже 230
Температура хрупкости по Фраасу, °С	-22	не выше -20
Растворимость, %	99,9	не менее 99,0
Содержание парафинов, мас. %	0,3	не выше 2,5

Таблица 2. Физико-химические характеристики образцов кокса

Характеристики	Угольный кокс	Требования ГОСТ 22898-78
Массовая доля общей влаги, мас. %	6,9	не более 3,0
Массовая доля летучих веществ, мас. %	9,2	не более 9,0
Зольность, мас. %	2,9	не более 0,5
Массовая доля серы, %	1,15	не более 1,0-1,5
Теплота сгорания, МДж/кг	31,0	–
Массовая доля, %:		
– ванадия	–	не более 0,01-0,02
– железа	0,05	не более 0,05-0,08
– кремния	0,27	не более 0,04-0,08
Элементный состав, мас. %		
– углерод	84,6	–
– водород	0,3	–
– азот	1,9	–
– кислород	12,0	–

Для получения микродиспергированного гранулированного порошка кокса была проведена механохимическая обработка образцов в течение 20, 40 мин при скорости вращения 1200 об/мин, соотношении шаров 1:2. Средний размер полученных частиц составляет менее 0,5 мм.

В качестве готовых модификаторов полимерно-битумных вяжущих использовали полимеры СБС-330Л (Нижнекамск, РФ) и Elvaloy (США). Свойства полимера СБС представлены в табл. 3. Показатель плотности СБС используется для определения однородности каучука, так как массовая доля связанного стирола влияет на физические свойства каучука. СБС характеризуется низким содержанием летучих веществ (0,04 мас.%) и зольностью (0,2 мас.%).

Полимерный модификатор Elvaloy обеспечивает высокую стойкость к колееобразованию. Установлено, что в зависимости от дозировки Elvaloy увеличивает интервал пластичности битумного вяжущего до 30 °С [36]. Дорожные битумы, модифицированные полимером Elvaloy, обеспечивают высокую адгезию к минеральным материалам по сравнению с исходными битумами. Как видно из табл. 3, Elvaloy характеризуется

высокой плотностью 0,94 г/см³. Индекс расплава Elvaloy – 8 г/10 мин. Данный показатель показывает, насколько легко термопластический материал может течь при определенных давлении и температуре. Оба модификатора можно использовать в температурном интервале от 72 до 280 °С.

Также в качестве модификатора использовали вторичные полимерные отходы на основе полиэтилентерефталата, которые были переработаны методом механического рециклинга для получения гранул со средним размером 2 мм.

В рис. 1 приведена схема процесса модификации битумов полимерными отходами.

Приготовление лабораторных образцов полимерно-битумных вяжущих проводили с использованием различных модификаторов.

В первом эксперименте в битум, нагретый в реакторе до 110 °С, добавляли от 1 до 3 мас.% вторичных полимерных отходов на основе полиэтилентерефталата и от 1 до 3 мас.% модификаторов типа СБС (стирол-бутадиен-стирол) или Elvaloy от массы битума, затем смешивали в течение 3 ч. в сдвиговой мешалке со скоростью 4500 об/мин. После остывания образцов определяли их физико-механические показатели.

Таблица 3. Свойства полимерных модификаторов

Показатель	СБС-330Л	Elvaloy
Плотность при 20 °С, г/см ³	0,94	0,94
Индекс расплава 190 °С/2,16 кг	0,8 г/10 мин	8 г/10 мин
Массовая доля связанного стирола, мас. %	30,1	–
Кинематическая вязкость 5,23% по массе раствора в толуоле при 25 °С, сСт	14,0	–
Температура плавления, °С	–	72,0
Массовая доля летучих веществ, мас.%	0,04	0,01
Массовая доля золы, мас.%	0,2	0,1
Максимальная температура использования, °С	260	280
Предел прочности на разрыв, МПа	21,0	–



Рис. 1. Схема процесса модификации битумов полимерными отходами.

Во втором эксперименте в битум, нагретый в реакторе до 110 °С, добавляли от 0,5 до 1 мас.% порошка кокса от массы битума, затем смешивали в течение 3 ч. в сдвиговой мешалке со скоростью 4500 об/мин. После остывания образцов определяли их физико-механические показатели.

Для оценки соответствия модифицированного битума требованиям технических условий, предъявляемым к полимер-битумным вяжущим, определяли следующие основные физико-механические характеристики:

– *растяжимость* – по СТ РК 1374 на аппарате дуктилометре. Дуктильность или растяжимость битума косвенно относится к адгезии битума и зависит от природы его компонентов;

– *глубина проникания иглы* – по СТ РК 1226 с использованием пенетromетра. Пенетрация показывает уровень твердости битумных вяжущих;

– *температура размягчения* – по СТ РК 1227. Температура размягчения по КиШ характеризует переход битумных вяжущих из твердого состояния в жидкое;

– *хрупкость по Фраасу* – по СТ РК 1229. Температура хрупкости характеризует пороговое

значение температуры, при котором битум под воздействием охлаждения теряет вязкоупругие свойства и переходит в хрупкое состояние.

3. Результаты и обсуждение

В табл. 4-5 представлены основные физико-механические характеристики битумов, модифицированных полимерами. Как видно из табл. 4, с увеличением количества полимерного модификатора СБС наблюдается повышение температуры размягчения. Полимерно-битумное вяжущее с содержанием 1-3 мас.% полимерного отхода и 1-3 мас.% СБС по температурам размягчения, значениям пенетрации и растяжимости удовлетворяет требованиям ПБВ 40 по ГОСТ Р 52056-2003. После модификации полимерными отходами и СБС пенетрация битума снижается. Это объясняется тем, что после введения полимерных отходов вязкость битума увеличивается и снижается глубина проникания иглы. Увеличение содержания полимерного отхода в присутствии модификатора СБС повышает температуру размягчения битумного вяжущего. Полученные

Таблица 4. Физико-механические характеристики полимер-битумных вяжущих с добавками полимерных отходов и модификатора СБС марки 330Л

Наименование показателей	СБС марки 330Л, мас.%												ПБВ 40
	0	0	0	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Полимерный отход, мас.%	1	2	3	1	1	1	2	2	2	3	3	3	
Температура размягчения, °С	43,5	51,0	61,0	46,0	47,5	55,5	48,5	53,0	57,5	56,0	58,0	60,5	не ниже 56 °С
Пенетрация при 25 °С	61,0	45,0	38,3	55,3	58,5	45,0	53,0	43,8	40,0	41,3	33,8	31,0	не менее 40
Растяжимость при 25 °С, см	46,1	16,3	9,6	125	57,4	76,0	42,0	49,8	54,2	24,7	36,3	29,5	не менее 15 см

Таблица 5. Физико-механические характеристики полимер-битумных вяжущих с добавками полимерных отходов и Elvaloy

Наименование показателей	Elvaloy, мас.%								СТ РК 2534-2014
	1	2	1	1	1	2	2	2	
Полимерный отход, мас.%	0	0	1	2	3	1	2	3	
Температура размягчения, °С	48,0	57,0	51,0	56,5	58,0	44,0	63,0	62,0	не ниже 62 °С
Пенетрация при 25 °С	65,0	55,0	57,5	44,8	38,8	54,7	43,0	45,3	51-70
Растяжимость при 25 °С, см	150	62,3	61,2	32,6	15,0	55,4	22,1	27,0	не менее 20 см

результаты подтверждают предположение о том, что полимерные отходы следует использовать совместно с готовыми полимерными модификаторами [34].

Растяжимость битума резко снижается при использовании в качестве модификатора только полимерного отхода. В присутствии СБС растяжимость меняется монотонно и достигает своего минимального значения 24,7 см при добавлении 3 мас.% полимерного отхода. Это объясняется тем, что в процессе диспергирования полимерного отхода в объеме нерастворимых набухших полимерных частиц находятся смолы и полиароматические соединения, влияющие на значение растяжимости битумного вяжущего.

В табл. 5 приведены физико-механические характеристики ПБВ с добавками полимерных отходов и Elvaloy. Добавление Elvaloy также приводит к снижению пенетрации битума, при этом в результате растворения полимерных отходов процесс набухания происходит быстрее в сравнении с обычными полимерами, то есть молекулы Elvaloy вступают в реакцию быстрее с компонентами битума. Результаты анализа показали, что при добавлении 1 мас.% полимерного отхода и 1-2 мас.% Elvaloy ПБВ по значению пенетрации соответствует требованиям к БМП 50/70.

Показатели растяжимости битума с содержанием 1-2 мас.% полимерного отхода и 1-2 мас.% Elvaloy соответствуют требованиям БМП 50/70. Ранее было установлено [37], что при модификации битума Elvaloy происходит его химическое взаимодействие с асфальтенами с получением однородного компонента. В этой связи полимерные отходы могут играть роль наполнителя и снижать поверхностную силу битумного вяжущего,

что приводит к уменьшению растяжимости получаемого продукта. Согласно литературным данным [37], модификатор Elvaloy может реагировать с функциональными группами -ОН, -COОН, -NH₂, -SH и др., содержащимися в асфальтенах битума, создавая химическое взаимодействие.

Компоненты полимерных отходов, модифицированных полимером, стремятся сохранить на периферии своих мицелл углеводороды и смолы. Это доказывает использование полимерных отходов в составе асфальтобетонной смеси для повышения устойчивости к колееобразованию [38]. Полученный вяжущий материал в целом обладает большей когезионной прочностью и высокими адгезионными свойствами, которые способствуют улучшению устойчивости модифицированной асфальтобетонной смеси к сдвиговым и динамическим деформациям.

Химический состав образцов кокса исследовали методом ИК-спектроскопии. На рис. 2 представлен ИК-спектр угольного кокса. Полоса поглощения при 3032 см⁻¹ характерна для метиленовых групп алкильных заместителей R-CH₃ и R-CH₂ (рис. 2). Валентные полосы поглощения при 2367-2353 см⁻¹ обусловлены группами -NH- в составе кокса. Слабые полосы поглощения при 1494 см⁻¹ характерны для ароматических связей или насыщенных ароматических колец. Полосы поглощения в диапазоне 1424-1324 см⁻¹ показывают разветвления метильных групп. Средние полосы поглощения в диапазоне 1199-1031 см⁻¹ показывают серосодержащие соединения (S=O, S-O). Полосы поглощения от 848 до 738 см⁻¹ указывают на сульфидную связь, что согласуется с результатами элементного анализа.

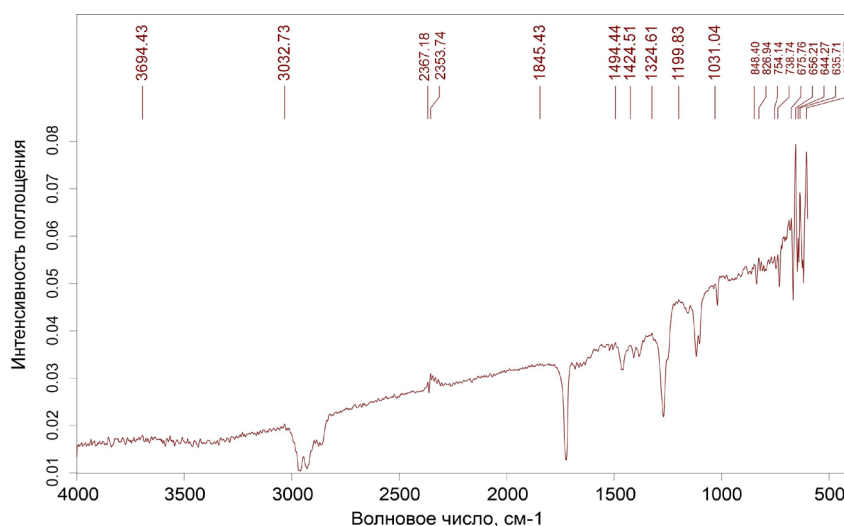


Рис. 2. ИК-спектр каменноугольного кокса.

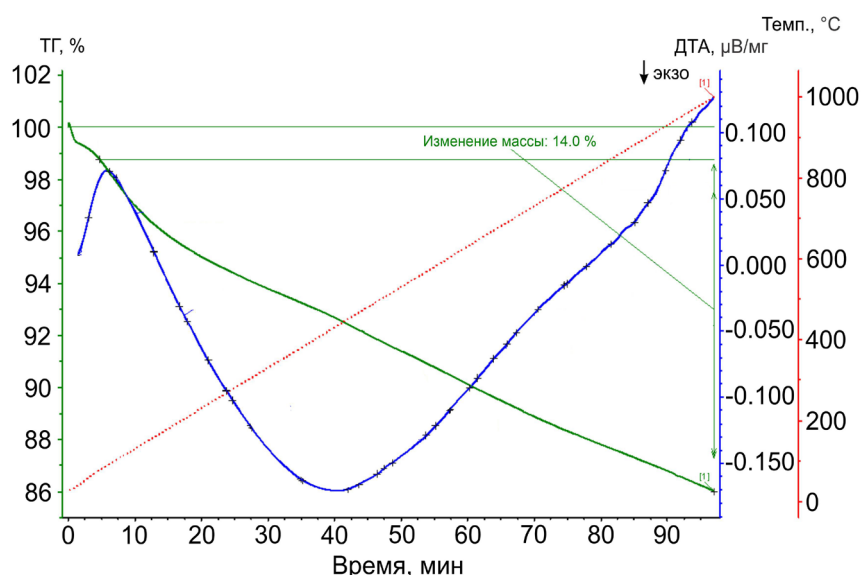


Рис. 3. ТГ/ДТА-кривые каменноугольного кокса.

Термогравиметрический анализ использовали для оценки термической стабильности кокса. На рис. 3 показаны результаты термогравиметрического анализа каменноугольного кокса. Согласно кривым, кокс разлагается в несколько стадий (синяя линия). Незначительная потеря массы при температуре 42,8 °С связана с удалением летучих соединений. Потеря массы при температуре 104,7 °С связана с удалением летучих соединений в виде адсорбционной воды. Значительная деструкция кокса начинается только при нагревании выше температуры 460 °С. При повышении температуры до 848 °С следует вторая стадия потери массы, отмечается незначительный экзотермический эффект, характерный для этого процесса. Относительная высокая термическая стабильность каменноугольного кокса связана с отсутствием третичных атомов углерода и наличием высокомолекулярных компонентов в виде фенантрена в макромолекуле кокса, которая трудно подвергается термической деструкции [39]. Общая потеря массы составила 14% (зеленая линия), что свидетельствует о высокой зольности каменноугольного кокса.

Зольность кокса составляет 2,9 мас.%. Следовательно, скорость разложения кокса меньше, а в составе исходного угля содержание минералогических компонентов выше. В табл. 6 представлены результаты модификации битума в присутствии микродиспергированного гранулированного порошка кокса. Незначительное повышение температуры размягчения объясняется тем, что кокс является агентом, повышающим температуру размягчения. Снижение значений пенетрации полученных продуктов объясняется тем, что увеличение содержания кокса приводит к адсорбции мальтеновой составляющей битума, в то же время компоненты кокса плохо реагируют с компонентами битума. Предполагается, что полученный модифицированный битум будет устойчив к окислению, так как ароматические соединения способствуют интенсивному набуханию, диспергированию и растворению кокса.

Таким образом, битум, модифицированный каменноугольным коксом, по показателям температуры размягчения и пенетрации соответствует требованиям полимерно-битумных вяжущих согласно ГОСТ Р 52056-2003.

Таблица 6. Результаты модификации битума каменноугольным коксом

Содержание кокса, мас.%	Температура размягчения, °С	Пенетрация при 25 °С	Требования ПБВ 40
0,5	52,7	58	– Температура размягчения не ниже 56 °С – Пенетрация не менее 40
0,75	54	45	
1	56	42	

4. Заключение

В результате исследования композиционных материалов, содержащих вторичные полимерные отходы, микродиспергированный гранулированный порошок кокса и модификаторы типа СБС (стирол-бутадиен-стирол) или Elvaloy, получены следующие выводы:

– установлено, что использование вторичных полимерных отходов для модификации битумов позволяет получить полимерно-битумные материалы, соответствующие требованиям СТ РК. Для предотвращения расслаивания полимеров от битума полимерные модификаторы целесообразно применять совместно с полимерными отходами;

– битум, содержащий до 3 мас.% модификатора СБС и полимерного отхода, по показателям пенетрации и растяжимости удовлетворяет требованиям СТ РК 2534-2014 на БМП 50/70;

– полимерно-битумное вяжущее с содержанием 1 мас.% полимерного отхода и 1 мас.% модификатора Elvaloy по физико-механическим показателям удовлетворяет требованиям СТ РК 2534-2014 на БМП 50/70;

– модифицированный битум с содержанием угольного кокса 1 мас.% удовлетворяет требованиям ПБВ 40 по ГОСТ Р 52056-2003. Результаты анализов показали, что микроразмерный кокс может использоваться в качестве сырья для модифицирования битума;

– определены оптимальные параметры процесса приготовления полимер-битумных вяжущих: содержание полимерного отхода – до 3 мас. %; температура процесса – 185 °С, время перемешивания – 3 ч.

Таким образом, использование вышеуказанных компонентов для модификации битумов обеспечивает улучшение эксплуатационных свойств дорожных покрытий.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки МНВО РК по проекту программно-целевого финансирования BR24992915 «Разработка технологии получения высокопрочного асфальтобетона на основе эластомерно-, полимерно-битумных вяжущих и плазмохимическая переработка жидких углеродсодержащих отходов».

Список литературы (ГОСТ)

- [1]. Riekstins A., Haritonovs V., Straupe V., Izaks R., Merijs-Meri R., Zicans J. Comparative environmental and economic assessment of a road pavement containing multiple sustainable materials and technologies // *Constr. Build. Mater.* – 2024. – Vol. 432. – P. 136522.
- [2]. Баженов А.В., Кузик И.В. Применение кокса в качестве модификатора битума: пат. 2753763 РФ. Бюл. № 24. 23.08.2021.
- [3]. Коротков А.В., Войтенко О.Н., Орлов Д.В., Ушакова И.В., Нечаев А.Н., Михайлов А.А., Кузнецова В.М. Структурирующая добавка для асфальтобетонных смесей: пат. 2793038 РФ. Бюл. № 10. 28.03.2023.
- [4]. Корнеев А.Д., Гончарова М.А., Андриянцева С.А., Комаричев А.В. Оптимизация строительно-технических свойств асфальтобетонов с применением отходов металлургического производства // *Фундаментальные исслед.* – 2015. – № 2. – С. 1620–1625.
- [5]. Готовцев В.М., Шатунов А.Г., Румянцев А.Н., Сухов В.Д. Нанотехнологии в производстве асфальтобетона // *Фундаментальные исслед.* – 2013. – № 1. – С. 191–195.
- [6]. Уфимцев В.М., Капустин Ф.Л., Пьячев В.А. Применение нефтекокса в производстве вяжущих материалов // *АлитИнформ-Цемент. Бетон. Сухие смеси.* – 2008. – Т. 3(2). – С. 23–28.
- [7]. Хайрутдинов И.Р., Жирнов Б.С., Арпишкин И.М. Аспекты применения сернистого нефтяного кокса в производстве цемента // *Башкир. хим. ж.* – 2012. – Т. 19(4). – С. 215–219.
- [8]. ОДМ218.4.036-2017. Методические рекомендации по приготовлению асфальтобетонных смесей, их укладке, а также приемке выполненных работ, основанные на методологии SUPERPAVE. – М.: Федер. дорожное агентство, 2017.
- [9]. Паршукова О.Р., Егоров А.Г., Андреев А.А., Тюкилина П.М., Карпеко Р.В. Исследование корреляций свойств нефтяных дорожных битумов по методологии Суперпейв // *Нефтепереработка и нефтехимия.* – 2020. – № 11. – С. 9–16.
- [10]. ГОСТ Р 58400.10-2019. Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Метод определения свойств с использованием динамического сдвигового реометра (DSR). – М.: Стандартинформ, 2019.
- [11]. Xue Y., Ge Z., Li F., Su S., Li B. Modified asphalt properties by blending petroleum asphalt and coal tar pitch // *Fuel.* – 2017. – Vol. 207. – P. 64–70.
- [12]. Schobert H.H., Song C. Chemicals and materials

- from coal in the 21st century // *Fuel*. – 2002. – Vol. 81. – P. 15–32.
- [13]. Pull A.S. Coal tar and paving products // *Environ. Health Perspect.* – 2006. – Vol. 114. – P. 210–215.
- [14]. Xue Y., Yang J., Liu Z. Paving asphalt modifier from co-processing of FCC slurry with coal // *Catal. Today*. – 2004. – Vol. 98. – P. 333–338.
- [15]. Wu M., Yang J., Zhang Y. Comparison study of modified asphalt by different coal liquefaction residues and different preparation methods // *Fuel*. – 2012. – Vol. 100. – P. 66–72.
- [16]. Chang H., Li X., Liu L. Preparation process of coal tar pitch powder and its stability research // *Sci. Technol. Energetic Mater.* – 2013. – Vol. 74. – P. 41–46.
- [17]. Alcaiz-Monge J., Cazorla-Amoros D. Characterization of coal tar pitches by thermal analysis, infrared spectroscopy and solvent fractionation // *Fuel*. – 2001. – Vol. 80. – P. 41–48.
- [18]. Sadeghi K.M., Sadeghi M., Wu W.H., Yen T.F. Fractionation of various heavy oils and bitumen for characterization based on polarity // *Fuel*. – 1989. – Vol. 68. – P. 782–787.
- [19]. Gu S.Q., Xu Z.Q., Ren Y.G., Zhang Y.X., Tu Y.N. Energy utilization of direct coal liquefaction residue via co-slurry with lignite: Slurryability, combustion characteristics, and their typical pollutant emissions // *Fuel*. – 2022. – Vol. 326. – P. 125037.
- [20]. Song Y.H., Lei S.M., Li J.C., Yin N., Zhou J., Lan X.Z. In situ FT-IR analysis of coke formation mechanism during co-pyrolysis of low-rank coal and direct coal liquefaction residue // *Renew. Energy*. – 2021. – Vol. 179. – P. 2048–2062.
- [21]. Song R.M., Sha A.M., Shi K., Li J.R., Li X.Z., Zhang F. Polyphosphoric acid and plasticizer modified asphalt: Rheological properties and modification mechanism // *Constr. Build. Mater.* – 2021. – Vol. 309. – P. 125158.
- [22]. Wang Y.J., Zuo H.B., Bai K.K., Chen J.S. Preparation of hot-pressed coal briquette with the extract from direct coal liquefaction residue // *J. Clean. Prod.* – 2022. – Vol. 341. – P. 130836.
- [23]. Jie J., Xin-qiang X., Ying X., Zhe W., Jia-ni W. Research on performance of direct coal liquefaction residue modified asphalt mortar // *J. Fuel Chem. Technol.* – 2021. – Vol. 49. – P. 1095–1101.
- [24]. Yang J.L., Wang Z.X., Liu Z.Y., Zhang Y.Z. Novel use of residue from direct coal liquefaction process // *Energy Fuels*. – 2009. – Vol. 23. – P. 4717–4722.
- [25]. Ji J., Yao H., Yang X., Xu Y., Suo Z., You Z.P. Performance analysis of direct coal liquefaction residue (DCLR) and Trinidad lake asphalt (TLA) for the purpose of modifying traditional asphalt // *Arab. J. Sci. Eng.* – 2016. – Vol. 41. – P. 3983–3993.
- [26]. Ji J., Wang Z., Li P.F., Zheng W.H., Xu X.Q., Wang Z.H., Han B.Y., Wei J.M., Li H.M. A review on direct coal liquefaction residue applied in asphalt pavements // *J. Clean. Prod.* – 2023. – Vol. 395. – P. 136273.
- [27]. Murugan K.P., Balaji M., Kar S.S., Swarnalatha S., Sekaran G. Nano fibrous carbon produced from chromium bearing tannery solid waste as the bitumen modifier // *J. Environ. Manage.* – 2020. – Vol. 270. – P. 110882.
- [28]. Kadhim H.J., Modarres A., Al-Busaltan S. Rheological and microstructural properties of nano-composite bitumen modified by nano-alumina and low-SBS content // *Case Stud. Constr. Mater.* – 2024. – Vol. 20. – P. e03244.
- [29]. Zghair Chfata A.H., Yaacoba H., Mohd Kamaruddin N.H., Al-Saffarc Z.H., Jaya R.P. Laboratory evaluation of micro and nano eggshell powder on physical and rheological properties of bitumen // *Green Technol. Sustain.* – 2025. – Vol. 3. – P. 100212.
- [30]. Arabani M., Sadeghnejad M., Haghanipour J., Hassanjani M.H. The influence of rice bran oil and nano-calcium oxide into bitumen as sustainable modifiers // *Case Stud. Constr. Mater.* – 2024. – Vol. 21. – P. e03458.
- [31]. Al-Jumaili M.A.H. Sustainability of asphalt paving materials containing different waste materials // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* – 2018. – Vol. 454. – P. 012176.
- [32]. Modarres A., Hamed H. Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes // *Mater. Des.* – 2014. – Vol. 61. – P. 8–15.
- [33]. Cong L., Peng J., Guo Z., Wang Q. Evaluation of fatigue cracking in asphalt mixtures based on surface energy // *J. Mater. Civ. Eng.* – 2015. – Vol. 29. – P. D4015003.
- [34]. Moghaddam T.B., Soltani M., Karim M.R. Experimental characterization of rutting performance of Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures under static and dynamic loads // *Constr. Build. Mater.* – 2014. – Vol. 65. – P. 487–494.
- [35]. Moghaddam T.B., Soltani M., Karim M.R. Evaluation of permanent deformation characteristics of unmodified and Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures using dynamic creep test // *Mater. Des.* – 2014. – Vol. 53. – P. 317–324.
- [36]. Jasso M., Perez Jaimes J.S., Tellez Vega E.F.

- Mechanism and development of thermorheological properties of asphalts modified by reactive polymer systems // *Mater.* – 2023. – Vol. 16. – P. 6631.
- [37]. Аюпов Д.А., Потапова Л.И., Мурафа А.В., Фахрутдинова В.Х., Хакимуллин Ю.Н., Хозин В.Г. Исследование особенностей взаимодействия битумов с полимерами // *Изв. КазГАСУ.* – 2011. – № 1(15). – С. 140–146.
- [38]. Polacco G., Filippi S., Merusi F., Stastna G. A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility // *Adv. Colloid Interface Sci.* – 2015. – Vol. 224. – P. 72–112.
- [39]. Akimbekov N.S., Digel I., Kozhahmetova M., Kuanysh T.T., Sherelkhan D.K., Xiaohui Q. Microbial co-processing and beneficiation of low-rank coals for clean fuel production: A review // *Eng. Sci.* – 2023. – Vol. 25. – P. 942.
- ### References
- [1]. A. Riekstins, V. Haritonovs, V. Straupe, et al. Comparative environmental and economic assessment of a road pavement containing multiple sustainable materials and technologies, *Constr. Build. Mater.* 432 (2024) 136522. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136522>.
- [2]. A. V. Bazhenov, I. V. Kuzik. Use of coke as a bitumen modifier: Patent 2753763 RF, Bull. No. 24 (2021) 23.08.2021. <https://patentimages.storage.googleapis.com/c5/b0/22/329803086cd6c8/RU2753763C1.pdf>. (in Russian).
- [3]. A. V. Korotkov, O. N. Voytenko, D. V. Orlov, I. V. Ushakova, A. N. Nechaev, A. A. Mikhajlov, V. M. Kuznetsova. Structuring additive for asphalt concrete mixtures: Patent 2793038 RF. Bull. No. 10, 28.03.2023. <https://patentimages.storage.googleapis.com/28/a2/d3/7c34332df61986/RU2793038C1.pdf> (in Russian).
- [4]. A.D. Korneev, M.A. Goncharova, S.A. Andriyantseva, A.V. Komarichev. Optimization of construction and technical properties of asphalt concrete using metallurgical waste. *Fundam. Res.* 2 (2015) 1620–1625. Available at: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=37281>. (in Russian).
- [5]. V.M. Gotovtsev, A.G. Shatunov, A.N. Rumyantsev, V.D. Sukhov. Nanotechnologies in asphalt concrete production. *Fundam. Res.* 1 (2013) 191–195. Available at: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=30925>. (in Russian).
- [6]. V.M. Ufimtsev, F.L. Kapustin, V.A. Pyachev. Application of petroleum coke in the production of binders. *AlitInform-Cement. Concrete. Dry Mixtures* 3(2) (2008) 23–28. Available at: https://alitinform.ru/wp-content/uploads/2019/09/ALITinform_03_2_2008-1.pdf. (in Russian).
- [7]. I.R. Khairutdinov, B.S. Zhirnov, I.M. Arpishkin. Aspects of using sulfur petroleum coke in cement production. *Bashkir Chem. J.* 19(4) (2012) 215–219. Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_18980948_44106728.pdf. (in Russian).
- [8]. ODM 218.4.036-2017. Methodological recommendations for the preparation of asphalt concrete mixtures, their laying, and acceptance of completed works, based on the SUPERPAVE methodology. Federal Road Agency, Moscow, 2017. Available at: <https://rosavtodor.gov.ru/storage/app/media/uploaded-files/199odm-2184036-2017.pdf>. (in Russian).
- [9]. O.R. Parshukova, A.G. Egorov, A.A. Andreev, P.M. Tyukilina, R.V. Karpeko. Study of correlations of petroleum road bitumen properties using the SUPERPAVE methodology. *Oil Refining and Petrochemistry* 11 (2020) 9–16. Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_44729900_38176858.pdf. (in Russian).
- [10]. GOST R 58400.10-2019. Public roads. Petroleum bituminous binders. Method for determining properties using a dynamic shear rheometer (DSR). Standartinform, Moscow, 2019. Available at: https://euro-test.ru/Pub.Lib/Normativ_docs/GOSTR58400.10-19.pdf. (in Russian).
- [11]. Y. Xue, Z. Ge, F. Li, et al. Modified asphalt properties by blending petroleum asphalt and coal tar pitch, *Fuel* 207 (2017) 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.06.064>.
- [12]. H.H. Schobert, C. Song. Chemicals and materials from coal in the 21st century, *Fuel* 81 (2002) 15–32. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(00\)00203-9](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00203-9).
- [13]. A.S. Pull. Coal tar and paving products, *Environ. Health Perspect.* 114 (2006) 210–215. <https://doi.org/10.1289/ehp.114-a210a>.
- [14]. Y. Xue, J. Yang, Z. Liu, et al. Paving asphalt modifier from co-processing of FCC slurry with coal, *Catal. Today* 98 (2004) 333–338. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2004.07.046>.
- [15]. M. Wu, J. Yang, Y. Zhang. Comparison study of modified asphalt by different coal liquefaction residues and different preparation methods, *Fuel* 100 (2012) 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.12.042>.
- [16]. H. Chang, X. Li, L. Liu. Preparation process of coal tar pitch powder and its stability research, *Sci. Technol. Energ. Mater.* 74 (2013) 41–46. <https://>

- www.jes.or.jp/mag/stem/Vol.74/documents/Vol.74,No.2,p.41-46.pdf.
- [17]. J. Alcaiz-Monge, D. Cazorla-Amoros, A Linares-Solano. Characterization of coal tar pitches by thermal analysis, infrared spectroscopy and solvent fractionation, *Fuel* 80 (2001) 41–48. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(00\)00057-0](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00057-0).
 - [18]. K.M. Sadeghi, M. Sadeghi, W.H. Wu, et al. Fractionation of various heavy oils and bitumen for characterization based on polarity, *Fuel* 68 (1989) 782–787. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(89\)90219-6](https://doi.org/10.1016/0016-2361(89)90219-6).
 - [19]. S.Q. Gu, Z.Q. Xu, Y.G. Ren, et al. Energy utilization of direct coal liquefaction residue via co-slurry with lignite: Slurryability, combustion characteristics, and their typical pollutant emissions, *Fuel* 326 (2022) 125037. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125037>.
 - [20]. Y.H. Song, S.M. Lei, J.C. Li, et al. In situ FT-IR analysis of coke formation mechanism during co-pyrolysis of low-rank coal and direct coal liquefaction residue, *Renew. Energy* 179 (2021) 2048–2062. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.030>.
 - [21]. R.M. Song, A.M. Sha, K. Shi, J.R. Li, et al. Polyphosphoric acid and plasticizer modified asphalt: Rheological properties and modification mechanism, *Constr. Build. Mater.* 309 (2021) 125158. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125158>.
 - [22]. Y.J. Wang, H.B. Zuo, K.K. Bai, et al. Preparation of hot-pressed coal briquette with the extract from direct coal liquefaction residue, *J. Clean. Prod.* 341 (2022) 130836. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130836>.
 - [23]. J. Jie, X.Q. Xin, X. Ying, et al. Research on performance of direct coal liquefaction residue modified asphalt mortar, *J. Fuel Chem. Technol.* 49 (2021) 1095–1101. [https://doi.org/10.1016/S1872-5813\(21\)60081-6](https://doi.org/10.1016/S1872-5813(21)60081-6).
 - [24]. J.L. Yang, Z.X. Wang, Z.Y. Liu, et al. Novel use of residue from direct coal liquefaction process, *Energy Fuels* 23 (2009) 4717–4722. <https://doi.org/10.1021/ef9000083>.
 - [25]. J. Ji, H. Yao, X. Yang, et al. Performance analysis of direct coal liquefaction residue (DCLR) and Trinidad lake asphalt (TLA) for the purpose of modifying traditional asphalt, *Arab. J. Sci. Eng.* 41 (2016) 3983–3993. <https://doi.org/10.1007/s13369-016-2034-5>.
 - [26]. J. Ji, Z. Wang, P.F. Li, et al. A review on direct coal liquefaction residue applied in asphalt pavements, *J. Clean. Prod.* 395 (2023) 136273. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136273>.
 - [27]. K.P. Murugan, M. Balaji, S.S. Kar, et al. Nano fibrous carbon produced from chromium bearing tannery solid waste as the bitumen modifier, *J. Environ. Manage.* 270 (2020) 110882. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110882>.
 - [28]. H.J. Kadhim, A. Modarres, S. Al-Busaltan. Rheological and microstructural properties of nano-composite bitumen modified by nano-alumina and low-SBS content, *Case Stud. Constr. Mater.* 20 (2024) e03244. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03244>.
 - [29]. A.H. Zghair Chfata, H. Yaacob, N.H. Mohd Kamaruddin, et al. Laboratory evaluation of micro and nano eggshell powder on physical and rheological properties of bitumen, *Green Technol. Sustain.* 3 (2025) 100212. <https://doi.org/10.1016/j.grets.2025.100212>.
 - [30]. M. Arabani, M. Sadeghnejad, J. Haghani-pour, et al. The influence of rice bran oil and nano-calcium oxide into bitumen as sustainable modifiers, *Case Stud. Constr. Mater.* 21 (2024) e03458. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03458>.
 - [31]. M.A.H. Al-Jumaili. Sustainability of asphalt paving materials containing different waste materials, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 454 (2018) 012176. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/454/1/012176>.
 - [32]. A. Modarres, H. Hamed. Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes, *Mater. Des.* 61 (2014) 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.04.046>.
 - [33]. L. Cong, J. Peng, Z. Guo, et al. Evaluation of fatigue cracking in asphalt mixtures based on surface energy, *J. Mater. Civ. Eng.* 29 (2015) D4015003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001465](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001465).
 - [34]. T.B. Moghaddam, M. Soltani, M.R. Karim. Experimental characterization of rutting performance of Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures under static and dynamic loads, *Constr. Build. Mater.* 65 (2014) 487–494. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.006>.
 - [35]. T.B. Moghaddam, M. Soltani, M.R. Karim. Evaluation of permanent deformation characteristics of unmodified and Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures using dynamic creep test, *Mater. Des.* 53 (2014) 317–324. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.015>.
 - [36]. M. Jasso, J.S. Perez Jaimes, E.F. Tellez Vega. Mechanism and Development of Thermo-Rheological Properties of Asphalts Modified by

- Reactive Polymer Systems, Materials 16 (2023) 6631. <https://doi.org/10.3390/ma16206631>.
- [37]. D.A. Ayupov, L.I. Potapova, A.V. Murafa, V.Kh. Fakhrutdinova, Yu.N. Khakimullin, V.G. Khozin. Study of the features of interaction between bitumen and polymers. *Izv. KazGASU* 1(15) (2011) 140–146. Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_16456831_92504250.pdf. (in Russian).
- [38]. G. Polacco, S. Filippi, F. Merusi, et al. A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility, *Adv. Colloid Interface Sci.* 224 (2015) 72–112. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.07.010>.
- [39]. N.S. Akimbekov, I. Digel, M. Kozhahmetova, et al. Microbial Co-processing and Beneficiation of Low-rank Coals for Clean Fuel Production: A Review, *Eng. Sci.* 25 (2023) 942. <https://dx.doi.org/10.30919/es942>.

Сведение об авторах

Е.И. Иманбаев – PhD, Ассоциированный профессор, ведущий научный сотрудник Института проблем горения, Алматы, Казахстан
E-mail: erzhan.imanbayev@gmail.com
ORCID: 0000-0001-8273-0020

Е.К. Онгарбаев – д.х.н., профессор, заведующей лабораторией нефтехимических процессов Института проблем горения, Алматы, Казахстан
E-mail: erdos.ongarbaev@kaznu.edu.kz
ORCID: 0000-0002-0418-9360

А.Б. Жамболова – PhD, ведущий научный сотрудник Института проблем горения, Алматы, Казахстан
E-mail: zhambolova.ainur@mail.ru

Е. Тилеуберди – PhD, Ассоциированный профессор, ведущий научный сотрудник Института проблем горения, Алматы, Казахстан
E-mail: er.tileuberdi@gmail.com
ORCID: 0000-0001-9733-5015

Е. Канжаркан – магистр технических наук, докторант Казахского национального педагогического университета им. Абая, Алматы, Казахстан
E-mail: kanzharkanyernar@gmail.com

А.Р. Кенжегалиева – старший научный сотрудник Института проблем горения, Алматы, Казахстан
E-mail: aleka4204@mail.ru

А.Н. Кыдырали – докторант КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан
E-mail: aksaule2014r@gmail.com

Д. Мукталы – PhD, старший научный сотрудник Института проблем горения, Алматы, Казахстан
E-mail: dinara.muktaly@mail.ru
ORCID: 0000-0002-1139-5488

Preparation of the Composition of Composite Materials Based on Polymers and Solid Carbon Materials

Y.I. Imanbayev^{1*}, Y.K. Ongarbayev^{1,2}, A.B. Zhambolova¹, Y. Tileuberdi¹, Y. Kanzhankan³, A.R. Kenzhegaliev¹, A.N. Kydyrali², D. Mukhtaly¹

¹Institute of Combustion Problems, Bogenbai Batyr st., 172, Almaty, Kazakhstan

²Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi ave., 71, Almaty, Kazakhstan

³Abai Kazakh National Pedagogical University, Dostyk ave., 13, Almaty, Kazakhstan

ABSTRACT

The use of household polymer waste in bitumen modification is one of the promising areas that allows providing the road surface with maximum resistance to fatigue failure, resistance to temperature changes in daily and seasonal cycles and a direction in solving environmental problems. In addition, using polymer waste can solve the problem of the increased cost of bitumen modified with polymers. In this research work, the compositions and physical-chemical characteristics of bitumen, polymer-bitumen binders and coal coke are studied. The detailed chemical composition of coal coke was studied using IR spectroscopy and thermogravimetric analysis. Addition of microdispersed coke during bitumen modification shows improvement of the characteristics of the obtained product similar to polymer-bitumen binders. Polymer-bitumen binder with addition of polymer waste and polymer modifier Elvaloy meets the requirements of ST RK 2534-2014 for BMP 50/70 in terms of its main indicators. During the process of bitumen modification with polymer waste, polymer particles physically react with high-molecular components (asphaltenes, resins and polyaromatic compounds), which affects the physical and mechanical properties of the bitumen binder: the softening temperature increases, the penetration and ductility values decreased. Addition of microdispersed granulated coke powders for modification of road bitumen meets the requirement of PBB 40 according to GOST R 52056-2003.

Keywords: bitumen, modification, coke, mechanochemical processing, polymer waste, polymer-bitumen binders, modifier.

Полимерлер мен қатты көміртекті материалдар негізінде композициялық материалдардың құрамын әзірлеу

Е.И. Иманбаев^{1*}, Е.К. Оңғарбаев^{1,2}, А.Б. Жамболова¹, Е. Тілеуберді¹, Е. Канжаркан³, А.Р. Кенжеғалиева¹, А.Н. Қыдырәлі², Д. Мұқталы¹

¹Жану проблемалары институты, Бөгенбай батыр к., 172, Алматы, Қазақстан

²Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, әл-Фараби д., 71, Алматы, Қазақстан

³Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Достық д., 13, Алматы қ., Қазақстан

АНДАТПА

Тұрмыстық полимерлі қалдықтарды битумды модификациялауда пайдалану жол төсемдерін шаршау бұзылыстарына максималды тұрақтылықпен қамтамасыз етуге, тәуліктік және маусымдық циклдардағы температураның өзгеруіне төзімділікке және экологиялық мәселелерді шешуге бағытталған перспективалы бағыттардың бірі болып табылады. Сонымен қатар, полимерлі қалдықтарды жол құрылысында пайдалану полимермен модификацияланған битумның қымбаттауы мәселесін шеше алады. Бұл ғылыми жұмыста битум, полимер-битум байланыстырғыштар мен көмір коксының құрамы мен физика-химиялық сипаттамалары зерттелді. Көмір коксының егжей-тегжейлі химиялық құрамы ИҚ-спектроскопия және термогравиметриялық талдау арқылы зерттелді. Битумды модификациялау кезінде микродисперсті коксты қосу арқылы алынған өнімнің полимер-битум байланыстырғыштарына ұқсас сипаттамаларының жақсарғанын көрсетеді. Полимерлі қалдықтар және Elvaloy дайын полимерлі модификаторы қосылып алынған полимерлі-битум байланыстырғыштар негізгі көрсеткіштер бойынша ПМБ 50/70 үшін ҚР СТ 2534-2014 талаптарына сәйкес келеді. Битумды полимерлі қалдықтарымен модификациялау процесінде полимер бөлшектері жоғары молекулалы компоненттермен (асфальтендер, шайырлар және полиароматты қосылыстар) физикалық реакцияға түседі, бұл битум байланыстырғыштың физикалық-механикалық қасиеттеріне әсер етеді: жұмсарту температурасы артады, иненің ену тереңдігі және созылу мәндері төмендейді. Жол битумдарын модификациялау үшін микродисперсті түйіршіктелген кокс ұнтақтарын қосу МемСТ Р 52056-2003 бойынша ПБТ 40 талаптарына сәйкес келеді.

Түйін сөздер: битум, модификация, кокс, механохимиялық өңдеу, полимерлі қалдықтар, полимерлі-битумды байланыстырғыштар, модификатор.