

ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ И ГАЗА

DOI: 10.15593/2224-9400/2024.2.07
УДК 665.775.4

Научная статья

**Р.А. Ваганов, С.С. Косицына,
Ф.А. Бурюкин, В.А. Сафин**

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ БИТУМА, МОДИФИЦИРОВАННОГО ПРОДУКТАМИ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ ПОЛИЭТИЛЕНА

Благодаря высоким эксплуатационным характеристикам, объемы производства и потребления полимерно-битумных вяжущих возрастают с каждым годом. Помимо термоэластопластов, для модификации битума могут использоваться полиолефины, такие как полиэтилен высокого и низкого давления и полипропилен, в основном атактический, придающие вяжущему повышенную механическую прочность. Также для модификации битумов может использоваться вторичное сырье, различные пластиковые отходы и продукты их химической переработки.

Перспективными направлениями для переработки отходов полиолефинов в функциональные материалы и топливные компоненты являются мягкий пиролиз в стационарном слое и окисление. Данные способы переработки являются универсальными по сырью, не требуют применения дорогостоящих катализаторов и оборудования.

Основной целью данной работы являлось получение и исследование состава и свойств продуктов мягкого крекинга отходов полиэтилена низкой и высокой плотности и их последующего окисления для оценки возможности использования в качестве добавки к нефтяным битумам разной степени окисленности.

Пиролиз отходов полиэтилена проводили при температуре 540 °С в стационарном слое. Полученные жидкие продукты окисляли кислородом при температурах 80 и 120 °С в течение 3–24 ч. Продукты пиролиза и окисления анализировали по показателям температуры плавления, плотности, вязкости, кислотного числа. Состав продуктов анализировали методом ИК-спектроскопии. Полученные материалы вводили в битум дорожный марки БНД100/130 и строительный марки БН90/10 в концентрации от 2 до 6 %. Для полученных образцов битума определяли температуру размягчения, пенетрацию, растяжимость и температуру хрупкости.

В работе показано, что окисленный пиролизный полиэтилен положительно влияет на пластические свойства битумов, способствуя увеличению растяжимости и глубины проникновения иглы без значительного снижения температуры размягчения.

Ключевые слова: дорожный битум, строительный битум, полиэтилен, крекинг, окисление.

R.A. Vaganov, S.S. Kositsyna, F.A. Buriukin, V.A. Safin

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

BITUMEN COMPOSITIONS CONTAINING PRODUCTS OF CHEMICAL PROCESSING OF POLYETHYLENE WASTE

The production and consumption of polymer-bitumen materials increases annually. This is due to their high performance characteristics. Instead of thermoplastic elastomers, polyolefins can be used to modify bitumen, such as high- and low-density polyethylene and polypropylene, mainly atactic, which give bitumen high mechanical strength. To modify bitumen, primary and secondary raw materials, various plastic waste and products of their chemical processing can be used.

Promising directions for processing waste polyolefins into functional materials and fuel components are soft pyrolysis in a stationary bed and oxidation. These processing methods are universal in terms of raw materials and do not require the use of expensive catalysts and equipment.

The main goal of this work was to obtain and study the composition and properties of the products of soft pyrolysis of low- and high-density polyethylene waste and their subsequent oxidation to assess the possibility of using it as an additive to petroleum bitumens of varying degrees of oxidation.

Pyrolysis of polyethylene waste was carried out at a temperature of 540 °C in a stationary bed. The resulting liquid products were oxidized with oxygen at temperatures of 80 and 120 °C for 3-24 hours. The products of pyrolysis and oxidation were analyzed in terms of melting point, density, viscosity, and acid number. The composition of the products was analyzed by IR spectroscopy. The resulting materials were introduced into road bitumen BND100/130 and construction bitumen BN90/10 in an amount of 2 to 6%. For the obtained bitumen samples, the softening temperature, penetration, elongation and brittleness temperature were determined.

The work shows that oxidized pyrolysis polyethylene has a positive effect on the plastic properties of bitumen, increases ductility and penetration without significantly reducing the softening point.

Keywords: road bitumen, construction bitumen, polyethylene, cracking, oxidation.

Несмотря на то, что основным типом полимеров, используемых для модификации битума, являются термоэластопласты, такие как стирол-бутадиен-стирол различного строения, сополимеры стирола с изопреном и бутиленом, большое количество исследований посвящено получению полимерно-битумного вяжущего, модифицированного полиолефинами, в том числе вторичными [1].

Важным достоинством полиолефинов как модификатора битумов является их низкая стоимость. Однако несмотря на хорошую растворимость, для них характерна низкая устойчивость в битумной матрице, связанная с отсутствием полярных функциональных групп, которые за

счет химического взаимодействия с компонентами битума обеспечивают формирование пространственной сетки, придающей системе структурную прочность [6].

Добавка полиолефинов к битуму обеспечивают высокую жесткость и хорошую устойчивость к колебаниям, но при этом низкую эластичность и седиментационную устойчивость [2, 3]. В отношении полиэтилена сообщается [4], что его добавка в битум приводит к ухудшению эластичности, однако полученное полимерно-битумное вяжущее характеризуется высокой химической стабильностью. В отношении полипропилена (в основном атактического), в том числе окисленного при температурах 150–200 °С в течение 1–6 ч и расходе окислителя (воздуха) от 0,6 до 1,9 л/(кг·мин), показано хорошее улучшение пластичности, химической стойкости и теплостойкости [5]. Кроме того, окисленный атактический полипропилен используется как компонент гидроизоляционных материалов, резинобитумных смесей и клеев.

В настоящее время основным способом преодоления ограничений по использованию полимерно-битумных компаундов, связанных с низкой устойчивостью и высокой склонностью к окислению, является вулканизация с серой. Считается, что сера действует двумя способами: химически сшивает молекулы полимера и тем самым связывает полимер и битум посредством сульфидных и / или полисульфидных связей. Из-за того, что основой процесса является взаимодействие серы с кратными связями, этот метод ограничен полимерно-битумными материалами, полученными с использованием термоэластопластов [7].

Помимо этого, предлагаются и другие способы [1], например использование так называемых реактивных полимеров, которые химически реагируют (а не физически смешиваются или взаимодействуют) с некоторыми компонентами битума; добавка антиоксидантов (что не актуально при использовании полиолефинов); использование гидрофобных наполнителей, а также химическая модификация вводимых в битум полимеров (гидрогенизация и введение дополнительных полярных функциональных групп).

Химическая модификация полимеров заключается в основном в введении в молекулу полярных функциональных групп, например амино-, гидроксо-, эпокси- и карбоксильных групп, для того чтобы улучшить совместимость полимеров с битумом [8]. Это направление требует дальнейшего развития, так как в настоящее время эти процессы являются дорогостоящими и плохо управляемыми.

Направление исследований по использованию вторичных полимеров и полимерсодержащих отходов при приготовлении битумных материалов также активно развивается [1]. Основными типами полимеров, используемых вторично для приготовления дорожных связующих, являются полиолефины и резиновая крошка [9]. Отходы полиолефинов вводятся в битум индивидуально или вместе с термоэластопластами. В ряде работ показано [10, 11], что возможно получение полимерно-битумного материала высокого качества с достаточной устойчивостью при хранении и хорошими эксплуатационными характеристиками [6, 8].

Термохимическая переработка, в частности медленный пиролиз в стационарном слое, является доступным и универсальным по сырью методом переработки различных углеводородсодержащих отходов [12, 13]. При переработке полиолефинов важным достоинством этого метода является низкая токсичность газообразных выбросов, по сравнению с гетероатомными полимерами [14, 15]. Показано [16], что при невысокой температуре пиролиза (от 500 °С) смеси пластиковых отходов, содержащей 40 % полиэтилена и 18 % полипропилена, образуется до 70 % вязких жидкостей с высоким содержанием длинных углеводородных цепей, в том числе линейных олефинов, и низшей ароматики.

За счет меньшего молекулярного веса растворимость, диспергируемость продуктов пиролиза полимеров и седиментационная устойчивость битумного компаунда по сравнению с исходными полиолефинами выше. Известно [17] об использовании низкомолекулярного полиэтилена, побочного продукта полимерного производства, в качестве модификатора дорожного и строительного битума. Показано, что добавка низкомолекулярного полиэтилена к битуму приводит к увеличению значений дуктильности и пенетрации, снижению температур размягчения и хрупкости.

Таким образом, целесообразно рассмотреть возможность использования жидких продуктов крекинга полиэтилена как модификатора битума. Окисление продуктов крекинга позволит улучшить совместимость добавки с битумной матрицей и тем самым повысить эксплуатационные характеристики материала за счет введения гидроксильных, карбонильных, карбоксильных функциональных групп [18]. Целью работы является получение продуктов медленного пиролиза полиэтилена в стационарном слое и их окисление для оценки возможности использования как функциональной добавки для улучшения свойств дорожного и строительного битума.

Экспериментальная часть. В качестве матрицы в работе использовали образцы дорожного и строительного битума, полученного окислением гудрона западносибирской малосернистой нефти, марок БНД100/130 и БН90/10 соответственно. Характеристики битумов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты технического анализа исходных образцов битума

Наименование показателя	Марка битума	
	БНД100/130	БН90/10
Температура размягчения по методу «Кольцо и шар», °С	55	90
Глубина проникновения иглы при 25 °С, 0,1 мм	110	10
Температура хрупкости по Фраасу, °С	-22	0
Растяжимость по 0 °С, см	6	–
Растяжимость по 25 °С, см	17,5	2,5
Растворимость, %	99,9	99,9

Для модификации битумов использовали продукты крекинга и окисления отходов полиэтилена, полученные следующим образом. Отходы неокрашенного полиэтилена включали полиэтиленовую пленку, упаковку пищевых продуктов, маркированную LDPE, HDPE. Материалы тщательно промывали проточной водой с моющим средством, сушили на воздухе и измельчали вручную до средней крупности 1,0–1,5 см. Измельченные отходы помещали в фарфоровый тигель и затем в реактор из нержавеющей стали с пароотводной трубкой на крышке. Реактор помещался в муфельную печь и нагревался вместе с печью со средней скоростью 10 °С/мин до температуры 540 °С и выдерживали 3 ч. Продукты крекинга отводились в парообразном виде через пароотводную трубку и конденсировались в колбе-сборнике. Схема установки для пиролиза представлена на рис. 1.

Далее навески 20 г полученных продуктов крекинга подвергали окислению кислородом при нагреве в масляной бане до 80 и 120 °С с расходом 5 мл/мин в течение 3, 6, 12 и 24 ч.

Окисленные продукты крекинга полиэтилена вводили в расплавленный битум в количестве 2, 4, 6 % мас. при температуре 140–150 °С и перемешивании верхнеприводной мешалкой до полной однородности в течение 1 ч.

В качестве образца для сравнения использовали измельченную в лабораторной мельнице полиэтиленовую пленку, которую предварительно для набухания оставляли в нефрасе 130/150 на 8–12 ч. Набухший

полимер вводили в битум аналогично способу, указанному выше, но в этом случае гомогенизация смеси достигалась в среднем за 3 ч.

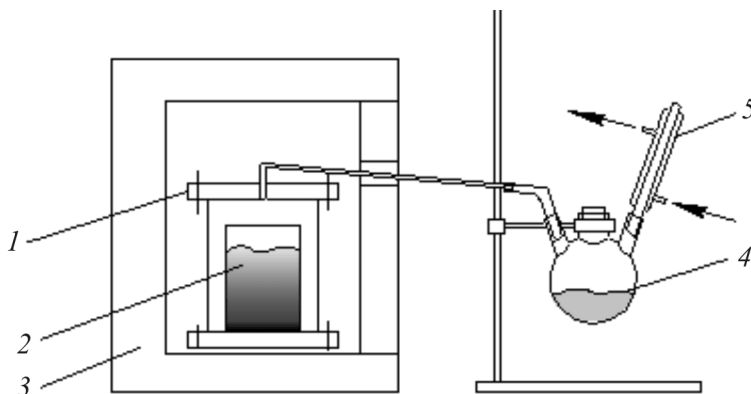


Рис. 1. Принципиальная схема установки для пиролиза полимеров:
1 – реактор пиролиза; 2 – фарфоровый тигель с сырьем; 3 – муфельная печь;
4 – колба-сборник продуктов; 5 – водяной холодильник

Образцы неокисленных и окисленных продуктов крекинга полиэтилена анализировали методами ИК-фурье-спектроскопии на базе Центра коллективного пользования Сибирского федерального университета «Научно-исследовательские методы исследования и анализа новых материалов, наноматериалов и минерального сырья» (спектрометр Nicolet 380), определяли кислотное число по ГОСТ 5985. Состав газообразных продуктов крекинга определяли методом капиллярной газовой хроматографии на хроматографе Clagus 500 с пламенно-ионизационным детектором и капиллярной колонкой, содержащей в качестве твердой фазы метилсилоксан.

Образцы модифицированного битума анализировали по показателям табл. 1. Температуру размягчения определяли на ручном приборе КИШ-01 по ГОСТ 11506, глубину проникновения иглы – на автоматическом пенетрометре Setamatic по ГОСТ 11501, растяжимость при 25 °С – автоматическом дуктилометре Matest B055 в водной бане по ГОСТ 33138, температуру хрупкости по ГОСТ 11507 – на ручном аппарате Фрааса.

Результаты и их обсуждение. В результате крекинга полиэтилена был получен мазеобразный продукт светло-желтого цвета с температурой плавления 39–49 °С, плотностью 20 °С 0,835–0,836 г/см³ и кинематической вязкостью при 50 °С 36 мм²/с. Кислотность (кислотное число) пробы отсутствовала. Выход продуктов крекинга составлял 78–86 % мас. в расчете на загруженный полиэтилен. Масса остатка в тигле не превышала 0,05 г и представляла собой золу. Остальное было представлено

газообразными несконденсировавшимися продуктами [19], углеводородная часть которого состояла в основном из метана (до 64–72 % об.), остальное этан (7–12 % об.), этилен (2–5 %), пропан и пропилен.

Окисленный пиролизный полиэтилен – вязкая мазеобразная масса желтого цвета с температурой плавления 5–22 °С, плотностью при 20 °С 835,0–839,0 г/см³ и кинематической вязкостью при 50 °С 62–98 мм²/с. С увеличением температуры и длительности окисления более 3 ч наблюдалось снижение температуры размягчения образцов и значительное увеличение кинематической вязкости. Кислотное число образцов составляло не более 2,5 мг КОН/г при окислении при 80 °С и 0; 5,2; 8,1 и 10,4 мг КОН/г при окислении в течение 3, 6, 12 и 24 ч при 120 °С соответственно. Внешний вид образцов неокисленных и окисленных продуктов крекинга полиэтилена представлен на рис. 2.

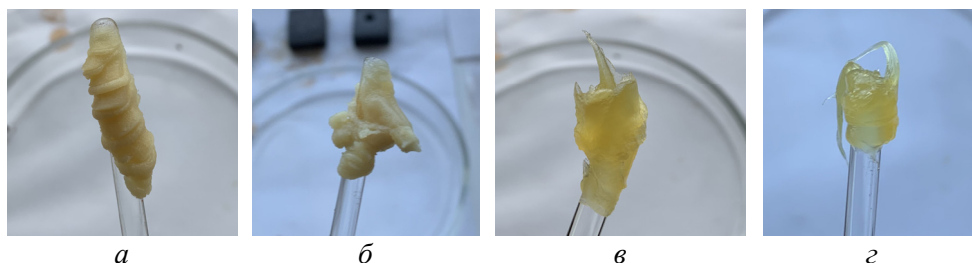


Рис. 2. Внешний вид образцов продуктов крекинга и окисления полиэтилена: *а* – крекинг 540 °С; *б* – крекинг 540 °С + окисление 80 °С 3 ч; *в* – крекинг 540 °С + окисление 120 °С 6 ч; *г* – крекинг 540 °С + окисление 120 °С 24 ч

Данные по зависимости выхода окисленных продуктов в зависимости от температуры и длительности окисления представлены в табл. 2.

Выход продуктов окисления значительно снижается при повышении температуры от 80 до 120 °С, что может быть связано с одновременно протекающими процессами отдувки из реакционной массы низкомолекулярных продуктов крекинга, окисления по кратным связям, окислительной деструкции и конденсации.

По данным ИК-спектроскопии видно, что образцы пиролизного полиэтилена (рис. 3, *б*) сохраняют состав и структуру исходного сырья (рис. 3, *а*).

Спектр вторичного полиэтилена содержит полосы валентных и деформационных колебаний, которые соответствуют колебаниям –СН₃ (2957, 1380 см⁻¹) и –СН₂– групп (2914, 1471 см⁻¹). В области деформационных маятниковых колебаний метиленовых групп наблюдается расщеп-

ление полос (731 и 717 см^{-1}), что соответствует длинным цепочкам $-\text{CH}_2-$ групп при записи спектра с образца полиэтилена в твердом состоянии.

Таблица 2

Зависимость выхода продуктов окисления пиролизного полиэтилена от температуры и длительности процесса

Условия окисления		Выход жидких продуктов, % мас.	
температура, °С	длительность, ч	в расчете на пиролизный полиэтилен	в расчете на исходное сырье (загруженный полиэтилен)
80	3	86,2	73,3
	6	85,1	69,8
	12	73,8	63,5
	24	77,1	60,9
120	3	81,4	68,4
	6	75,3	61,7
	12	63,7	54,8
	24	58,6	49,8

В продукте пиролиза исходного полиэтилена дополнительно регистрируются колебания, связанные с концевой кратной связью (3080 , 1302 , 991 , 1641 см^{-1}). Также наблюдается увеличение интенсивности полос, отвечающих колебаниям метильных групп. Это связано с разрушением алкильных цепочек под действием высокой температуры. Пиролиз и последующее окисление вторичного полиэтилена приводит к формированию различных кислородсодержащих группировок вместо кратных связей, так как на соответствующем ИК-спектре (рис. 3, в) полосы поглощения кратных связей отсутствуют. Сложный пик около 1700 см^{-1} включает полосы валентных колебаний карбонильной группы (1713 , 1726 см^{-1}). Колебания при 1762 см^{-1} могут соответствовать изолированной карбоксильной группе. Широкое малоинтенсивное поглощение с центром при 3482 см^{-1} , а также поглощение при 1237 и 1413 подтверждает наличие карбонильных и карбоксильных функциональных групп в окисленных образцах. Также предполагается, что в процессе окисления продуктов пиролиза происходит образование различных эфиров. Об этом могут свидетельствовать полосы колебаний при 1056 , 1173 и 909 см^{-1} .

Основными показателями, определяющими устойчивость и механическую прочность битумов при повышенной и пониженной температуре, а также вязкость, пластичность и способность сопротивляться внешнему воздействию, являются температура размягчения, температура хрупкости по методу Фрааса, растяжимость (дуктильность) при 0 °С

(для дорожных битумов) или при 25 °С (для строительных битумов) и глубина проникновения иглы (пенетрация).

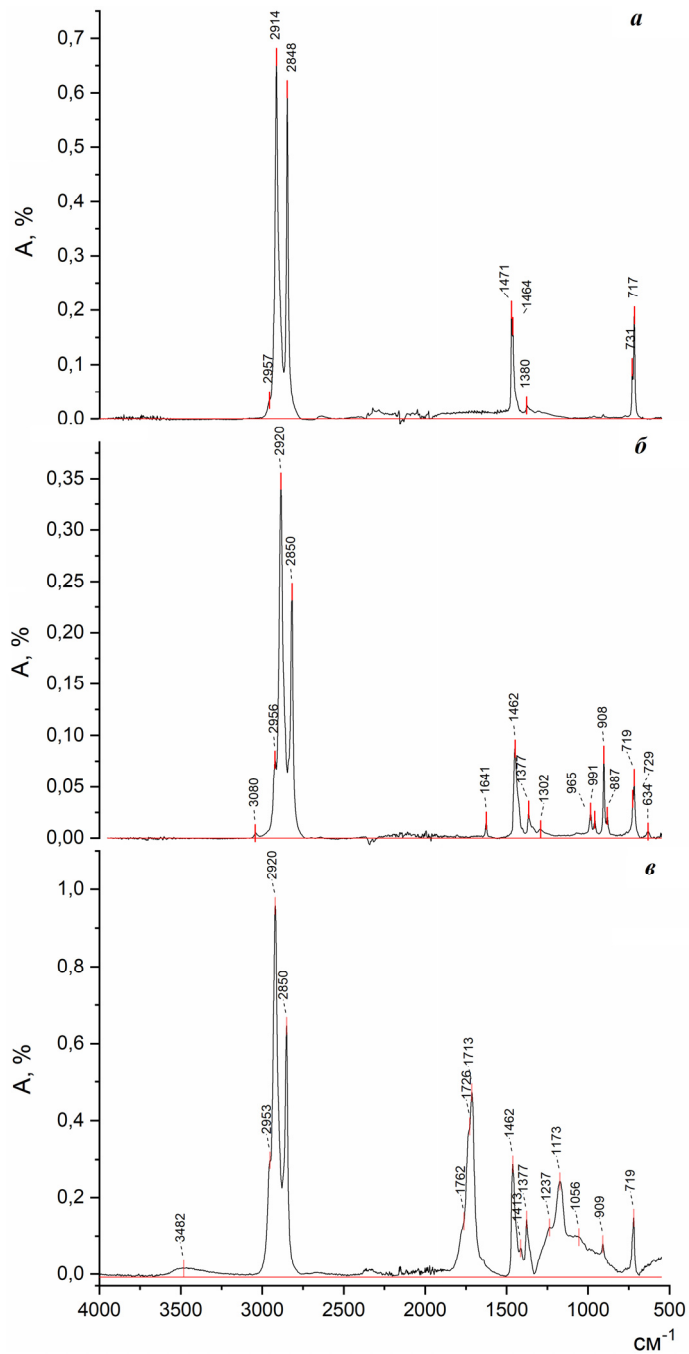


Рис. 3. Вторичный полиэтилен до обработки (а), после пиролиза (б), после пиролиза с последующим окислением (в)

Результаты анализа битумов с добавками 4 % мас. неокисленных и окисленных продуктов крекинга полиэтилена представлены в табл. 3.

Таблица 3

Влияние добавки полиэтилена, продуктов крекинга и окисления отходов полиэтилена (4 % мас.) на свойства дорожного и строительного битумов

пиролиз, температура, °С	Условия получения		$T_{\text{разм.}}$, «КиШ», °С	Глубина проникновения иглы, 0.1 мм	Температура хрупкости, °С
	окисление				
	температура, °С	длительность, ч			
Матрица: БНД100/130					
–	–	–	74	80,9	–13
540	80	–	49	116,0	–24
		3	48	116,0	–23
		6	51	118,0	–24
		12	52	120,0	–25
		24	51	122,0	–24
	120	3	45	118,0	–22
		6	50	122,0	–24
		12	52	125,0	–27
		24	54	131,0	–27
		Матрица: БН90/10			
–	–	–	117	3,4	0
540	80	–	75	13,0	0
		3	76	14,0	0
		6	78	16,0	–1
		12	77	16,0	–5
		24	79	18,0	–4
	120	3	78	18,0	–2
		6	78	20,0	–3
		12	79	20,0	–6
		24	83	21,0	–6

Как видно из данных, представленных в табл. 3, в отличие от исходного полиэтилена, продукты его крекинга обладают пластифицирующим действием, и их добавка приводит к снижению температуры размягчения и увеличению значения пенетрации. Также наблюдается небольшое улучшение низкотемпературной пластичности, на что указывает снижение температуры хрупкости. В то время как пиролизный полиэтилен влияет только на температуру размягчения и не оказывает значительного влияния на растяжимость и даже ухудшает ее по сравнению с немодифицированным битумом, с увеличением окисленности наблюдается однозначное положительное влияние на показатель дуктильности как дорож-

ного, так и строительного битума (рис. 4). Растяжимость при 25 °С битума БН 90/10 с добавкой 4 % пиролизного полиэтилена и окисленного пиролизного полиэтилена составляет 2,2 и 3,5 соответственно, исходного битума – 2,5 см. Для дорожного битума БНД100/130 растяжимость снижается с 17,5 до 12,2 см при добавке пиролизного полиэтилена, однако возрастает до 20,1 см с добавкой окисленного образца.

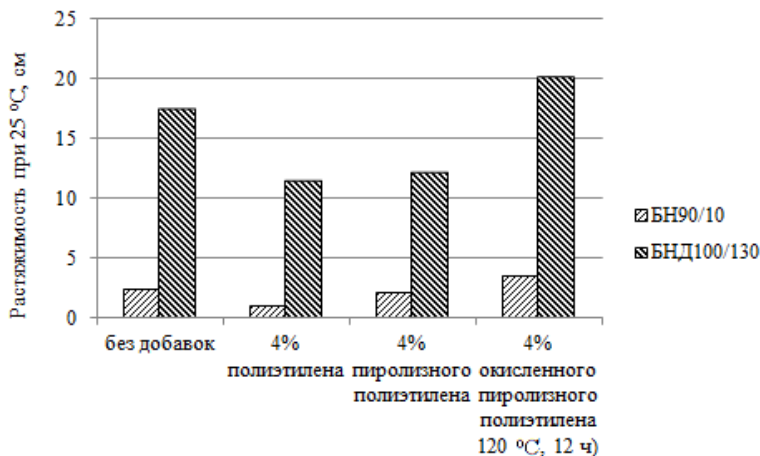


Рис. 4. Влияние добавки полиэтилена, продуктов крекинга и окисления полиэтилена на растяжимость образцов битума

Кроме того, обращает на себя внимание тот факт, что увеличение длительности окисления более 12 ч при температуре 120 °С нецелесообразно с точки зрения использования продукта окисления как пластификатора битума, так как различие в свойствах композиций практически отсутствует.

Для оценки влияния концентрации окисленного пиролизного полиэтилена на термическую стойкость и пластические свойства битума глубину проникновения иглы и температуру размягчения для образцов, полученных с добавкой 2,4 и 6 % мас. окисленного пиролизного полиэтилена. Окисление проводили при 120 °С в течение 12 ч (табл. 4).

Результаты измерений показывают, что значимое снижение температуры размягчения битумов наблюдается при добавке от 6 % мас. окисленного пиролизного полиэтилена. Продукты пиролиза и окисления полиэтилена позволяют снизить температуру размягчения битумного материала в среднем на 2 °С на каждый процент массовой добавки. В то же время глубина проникновения иглы в образец при концентрациях добавки уже от 4 % мас. значительно возрастает.

Таблица 4

Влияние добавки полиэтилена, продуктов крекинга и окисления отходов полиэтилена (4 % мас.) на свойства дорожного и строительного битумов

Концентрация окисленного пиролизного полиэтилена, % мас.	БН90/10	БНД100/130
Температура размягчения по методу «Кольцо и шар», °С		
0	90	55
2	88	52
4	79	51
6	74	47
Глубина проникновения иглы, 0.1 мм		
0	10	110
2	12	114
4	20	125
6	19	123

Заключение. В работе экспериментально показано влияние продуктов крекинга и окисления отходов полиэтилена на свойства дорожных и строительных битумов. Пиролизный полиэтилен в концентрации 4 % мас. снижает температуру размягчения битумов в среднем на 10 °С и способствует увеличению пенетрации на 3–6·0,1 мм. При этом уменьшается значение дуктильности, что указывает на нежелательное ухудшение пластических свойств.

Окисленный пиролизный полиэтилен, напротив, способствует улучшению растяжимости битумов и значений пенетрации без значительного снижения термической устойчивости. Так, температура размягчения и растяжимость при 25 °С образца немодифицированного дорожного битума составляли 55 °С и 17,5 см, с добавкой 4 % мас. пиролизного полиэтилена – 52 °С и 12,2 см, окисленного пиролизного полиэтилена – 51 °С и 0,1 см.

Значимого влияния на низкотемпературные свойства модификация битума продуктами пиролиза и пиролиза с последующим окислением не выявлено.

Оптимальными условиями окисления в данной серии экспериментов с точки зрения влияния на свойства битумов являются температура 120 °С и длительность не более 12 ч.

Список литературы

1. Navarro Domínguez, F.J. In Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Polymer Modified Bitume. The use of waste polymers to modify bitumen / F.J. Navarro Domínguez, M. García-Morales // Woodhead Publishing. – 2011. – P. 98–135.
2. Fawcett, A.H. Blends of bitumen with various polyolefins / A.H. Fawcett, T. McNally // Polymer. – 2000. – № 41(14). – P. 5315–5326.
3. Schaur, A. Impact of molecular structure of PP on thermo-rheological properties of polymer-modified bitumen / A. Schaur, S.H. Unterberger, R. Lackner // Construction and Building Materials. – 2021. – № 287. – 122981.
4. Герман, А.М. Применение полиэтилена истирол-бутадиен-стирольных модификаторов для производства дорожных полимерно-битумных вяжущих на базе неокисленных высококипящих нефтепродуктов / А.М. Герман, А.С. Ширкунов, В.Г. Рябов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2021. – № 4. – С. 55–69.
5. Пат. 2629678 С1 Рос. Федерация, МПК С08L 95/00. Способ получения битумно-полимерного вяжущего / А.В. Нехорошева, В.П. Нехорошев, С.В. Нехорошев, Е.В. Дахновская; заявитель Бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «Ханты-Мансийская государственная медицинская академия» (ХМГМА). – № 2016138999; заявл. 03.10.2016; опубл. 31.08.2017.
6. Степанович, Ю.А. Влияние добавок полиэтилена на структуру и свойства СБС-модифицированных битумов / Ю.А. Степанович, А.О. Шрубок // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. – 2022. – № 2 (259). – С. 49–55.
7. Пат. 2159218 С1 Рос. Федерация, МПК С04В 26/26 С08L 95/00 С04В 111/20. Способ получения серобитумного вяжущего / Р.Г. Теляшев, А.Н. Обрывалина, М.П. Павлуткина, М.В. Железнов, О.А. Шерстнев, В.А. Спусков, И.Г. Накипова; заявитель Открытое акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт по переработке нефти» (ОАО «ВНИИ НП»). – № 2015117667/03; заявл. 12.05.2015; опубл. 27.05.2016.
8. Kazemi, M. State of the art in the application of functionalized waste polymers in the built environment / M. Kazemi, H Fini E. // Resources, Conservation and Recycling. – 2022. – № 177. – 105967.
9. Letcher, T.M. Tire Waste and Recycling. Civil engineering applications / T.M. Letcher, V.L. Shulman, S. Amirhanian // Academic Press. – 2021. – P. 297–481.
10. Hong, Z. Effect of styrene-butadiene-styrene (SBS) on laboratory properties of low-density polyethylene (LDPE)/ethylene-vinyl acetate (EVA) compound modified asphalt / Z. Hong // Journal of Cleaner Production. – 2022. – № 338. – P. 282–289.

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

12. Красновских, М.П. Перспективы термохимической утилизации многокомпонентных и загрязненных полимерных отходов / М.П. Красновских // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. – 2023. – № 3. – С. 50–58.

13. Армишева, Г.Т. Исследование разложения отходов из поливинилхлорида / Г.Т. Армишева // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. – 2014. – № 4. – С. 141–150.

14. Ковалева, Н.Ю. Пиролиз пластиковых отходов. Обзор / Н.Ю. Ковалева, Е.Г. Раевская, А.В. Рошин // *Химическая безопасность*. – 2020. – Т. 4, № 1. – С. 48–79.

15. Красновских, М.П. К вопросу об опасности компонентов термической утилизации полимерных продуктов химических и нефтехимических отраслей промышленности в условиях урбанизированных территорий / М.П. Красновских // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. – 2020. – № 1(37). – С. 107–125.

16. Influence of time and temperature on pyrolysis of plastic wastes in a semi-batch reactor / A. Lopez, D. Marco, B.M. Caballero, M.F. Laresgoiti, A. Adrados // *Chemical Engineering Journal*. – 2011. – № 173. – P. 62–71.

17. Ле Чан, М.Д. Низкомолекулярный полиэтилен и его влияние на свойства дорожного нефтяного битума / М.Д. Ле Чан, М.Ю. Проценко // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. – 2018. – Т. 8, № 3(26). – С. 105–111.

18. Пат. 2301812 С1 Рос. Федерация, МПК C08F8/06 C08F110/06 B01J8/22. Окисленный агрессивный полипропилен с полярными функциональными возможностями, способ его получения и установка для осуществления / В.П. Нехорошев, В.И. Регнер, А.В. Нехорошева, К.Н. Гаевой; заявитель Государственное образовательное учреждение Высшего профессионального образования «Томский государственный университет». – № 2005136595/04; заявл. 24.11.2005; опубл. 27.06.2007.

19. Пиролиз отходов полиолефинов и Влияние продуктов пиролиза на низкотемпературные свойства нефтепродуктов / С.Н. Вильдякин, Ю.А. Истомин, С.С. Косицына, В.А. Сафин, Ф.А. Бурюкин // *Вестник Технологического университета*. – 2023. – Т. 26, № 7. – С. 43–49.

References

1. Navarro Domínguez F.J., García-Morales M. In *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Polymer Modified Bitume. The use of waste polymers to modify bitumen* Woodhead Publ., 2011, pp. 98-135.

2. Fawcett A.H., McNally T. Blends of bitumen with various polyolefins. *Polymer*, 2000, no. 41(14), pp. 5315-5326.

3. Schaur A., Unterberger S.H., Lackner R. Impact of molecular structure of PP on thermo-rheological properties of polymer-modified bitumen. *Constr. Build. Mater.*, 2021, no. 287, 122981.

4. German A.M., Shirkunov A.S., Rjabov V.G. Primenenie polijetilena istirolobutadien-stirol'nyh modifikatorov dlja proizvodstva dorozhnyh polimerno-bitumnyh vjzhushhhih na baze neokislennyh vysokokipjashhhih nefteproduktov [Application of polyethylene and styrenebutadiene-styrene modifiers for production of road polymer modified bitumen from non-oxidized heavy petroleum products]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Himicheskaja tehnologija i biotehnologija*, 2021, no. 4, pp. 55-69.

5. Nehorosheva A.V., Nehoroshev V.P., Nehoroshev S.V., Dahnovskaja E.V. Sposob poluchenija bitumno-polimernogo vjzhushhhego [Method for producing bitumen-polymer binder]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2629678 (2016)

6. Stepanovich Ju.A., Shrubok A.O. Vlijanie dobavok polijetilena na strukturu i svojstva SBS-modificirovannyh bitumov [influence of polyethylene additives on the structure and properties SBS-modified bitumens], *Trudy BGTU. Serija 2: Himicheskie tehnologii, biotehnologija, geojekologija*, 2022, no. 2 (259), pp. 49-55.

7. Teljashev R.G., Obryvalina A.N., Pavlutkina M.P., Zheleznov M.V., Sherstnev O.A., Spuskov V.A., Nakipova I.G. Sposob poluchenija serobitumnogo vjzhushhhego [Method for producing sulfur bitumen binder]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2159218 (2015)

8. Kazemi M., H Fini E. State of the art in the application of functionalized waste polymers in the built environment. *Resour. Conserv. Recycl.*, 2022, no. 177, 105967.

9. Letcher T.M., Shulman V.L., Amirkhanian S. Tire Waste and Recycling. Civil engineering applications. *Acad. Press*, 2021, pp. 297-481.

10. Hong Z. Effect of styrene-butadiene-styrene (SBS) on laboratory properties of low-density polyethylene (LDPE)/ethylene-vinyl acetate (EVA) compound modified asphalt. *J. Clean. Prod.*, 2022, no. 338, pp. 282-289.

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

12. Krasnovskih M.P. Perspektivy termohimicheskoy utilizacii mnogokomponentnyh i zagrjaznennyh polimernyh othodov. *Transport. Transportnye sooruzhenija. Jekologija*, 2023, no. 3, pp.50-58.

13. Armisheva G.T. Issledovanie razlozhenija othodov iz polivinilhlorida. *Vestnik PNIPU. Prikladnaja jekologija. Urbanistika*, 2014, no. 4, pp. 141-150.

14. Kovaleva N.Ju., Raevskaja E.G., Roshhin A.V. Piroлиз plastikovyh othodov. *Obzor // Himicheskaja bezopasnost'*, 2020, vol.4, no. 1, pp. 48-79.

15. Krasnovskih M.P. K voprosu ob opasnosti komponentov termicheskoy utilizacii polimernyh produktov himicheskikh i neftehimicheskikh otraslej promysh-

lenosti v uslovijah urbanizirovannyh territorij. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Prikladnaja jekologija. Urbanistika*, 2020, no. 1(37), pp. 107-125.

16. Lopez A., Marco D., Caballero B.M., Laresgoiti M.F., Adrados A. Influence of time and temperature on pyrolysis of plastic wastes in a semi-batch reactor. *Chem. Eng. J.*, 2011, no. 173, pp. 62-71.

17. Le Chan M.D., Procenko M.Ju. Nizkomolekuljarnyj polijetilen i ego vlijanie na svojstva dorozhnogo neftjanogo bituma [Low-molecular weight polyethylene and its effect on the properties of asphalt concrete]. *Izvestija vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*, 2018, vol. 8, no. 3(26), pp. 105-111.

18. Nehoroshev V.P., Regner V.I., Nehorosheva A.V., Gaevoj K.N. Sposob poluchenija serobitumnogo vjzhashhhego [Oxidized aggressive polypropylene with polar functionality, method of its production and installation for implementation]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2301812 (2005)

19. Vil'djajkin S.N., Istomin Ju.A., Kosicyna S.S., Safin V.A., Burjukin F.A. Piroлиз othodov poliolefinov i Vlijanie produktov piroliza na nizkotemperaturnye svojstva nefteproduktov [Pyrolysis of polyolefins waste and influence of pyrolysis products on the low-temperature properties of petroleum products]. *Vestnik Tehnologicheskogo universiteta*, 2023, vol. 26, no. 7, pp. 43-49.

Об авторах

Ваганов Роман Александрович (Красноярск, Россия) – старший преподаватель кафедры «Химия и технология природных энергоносителей и углеродных материалов» Сибирского федерального университета (660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79; e-mail: rvaganov@sfu-kras.ru).

Косицына Светлана Сергеевна (Красноярск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия и технология природных энергоносителей и углеродных материалов» Сибирского федерального университета (660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79; e-mail: skositsyna@sfu-kras.ru).

Бурюкин Федор Анатольевич (Красноярск, Россия) – кандидат химических наук, и.о. заведующего кафедрой «Химия и технология природных энергоносителей и углеродных материалов» Сибирского федерального университета (660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79; e-mail: fburyukin@sfu-kras.ru).

Сафин Владимир Александрович (Красноярск, Россия) – кандидат химических наук, доцент кафедры «Химия и технология природных энергоносителей и углеродных материалов» Сибирского федерального университета (660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79; e-mail: vsafin@sfu-kras.ru).

About the authors

Roman A. Vaganov (Krasnoyarsk, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Chemistry and Technology of Natural Energy Resources and Carbon Materials, Siberian Federal University (79, Svobodny av., Krasnoyarsk, 660041; e-mail: rvaganov@sfu-kras.ru).

Svetlana S. Kositsyna (Krasnoyarsk, Russian Federation) – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Chemistry and Technology of Natural Energy Resources and Carbon Materials, Siberian Federal University (79, Svobodny av., Krasnoyarsk, 660041; e-mail: skositsyna@sfu-kras.ru).

Fedor A. Buryukin (Krasnoyarsk, Russian Federation) – Ph.D. of Chemical Sciences, Head of Department, Department of Chemistry and Technology of Natural Energy Resources and Carbon Materials, Siberian Federal University (79, Svobodny av., Krasnoyarsk, 660041; e-mail: fburyukin@sfu-kras.ru).

Vladimir A. Safin (Krasnoyarsk, Russian Federation) – Ph.D. of Chemical Sciences, Associate Professor, Department of Chemistry and Technology of Natural Energy Resources and Carbon Materials, Siberian Federal University (79, Svobodny av., Krasnoyarsk, 660041; e-mail: vsafin@sfu-kras.ru).

Поступила: 10.04.2024

Одобрена: 02.06.2024

Принята к публикации: 13.06.2024

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Краевого государственного автономного учреждения «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности», Конкурс проектов прикладных научных исследований и экспериментальных разработок, выполняемых магистрантами, аспирантами и молодыми учеными в интересах первого климатического Научно-образовательного центра мирового уровня «Енисейская Сибирь», в том числе в целях обеспечения устойчивого развития Арктики и территорий Крайнего Севера.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Композиции на основе битума, модифицированного продуктами химической переработки отходов полиэтилена / Р.А. Ваганов, С.С. Косицына, Ф.А. Бурюкин, В.А. Сафин // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. – 2024. – № 2. – С. 86–102.

Please cite this article in English as:

Vaganov R.A., Kositsyna S.S., Buryukin F.A., Safin V.A. Compositions based on bitumen modified by products of chemical processing of polyethylene waste. *Bulletin of PNRPU. Chemical Technology and Biotechnology*, 2024, no. 2, pp. 86-102 (In Russ).