

УДК 665.775.5.038:665.334.94

М. В. Дуброва, А. О. Шрубок

Белорусский государственный технологический университет

**ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РАПСОВОГО МАСЛА НА СТАРЕНИЕ БИТУМА
МЕТОДОМ ИК-СПЕКТРОСКОПИИ**

В статье рассмотрены вопросы улучшения долговечности асфальтобетонных покрытий за счет повышения стойкости битума к старению. Цель работы заключалась в изучении процессов старения битума и поиске компонентов битумного вяжущего, обеспечивающих эффективное ингибирование процессов старения. Исследовано термо- и фотоокислительное старение битумного вяжущего, содержащего в качестве пластифицирующего агента рапсовое масло. Установлены закономерности изменения структурно-группового состава вяжущих в процессе термо- и фотоокислительного старения методом ИК-спектроскопии. Показано, что с увеличением длительности ультрафиолетового облучения в битуме накапливаются продукты термоокислительного старения. Это подтверждается возрастанием карбонильного и сульфоксидного индексов вяжущего, характеризующих наличие в битуме кислородсодержащих и сульфоксидных групп. Увеличение содержания рапсового масла в битуме приводит к снижению карбонильного и сульфоксидного индексов, т. е. наблюдается ингибирование процессов термо- и фотоокисления. Показано, что введение рапсового масла в битум позволяет снизить скорость реакции окисления, карбоксилирования и других химических превращений, вызывающих изменение структурно-группового состава вяжущего. Определено, что оптимальной концентрацией рапсового масла для введения в битум с целью ингибирования процессов окисления является 5 мас. %, при этой концентрации наблюдается увеличение стойкости к термоокислительному старению и обеспечиваются необходимые качественные характеристики битумных вяжущих.

Ключевые слова: битумное вяжущее, рапсовое масло, старение, структурно-групповой состав, термоокислительная стабильность, ИК-спектроскопия.

Для цитирования: Дуброва М. В., Шрубок А. О. Изучение влияния рапсового масла на старение битума методом ИК-спектроскопии // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2025. № 2 (295). С. 50–56.

DOI: 10.52065/2520-2669-2025-295-7.

M. V. Dubrova, A. O. Shrubok

Belarusian State Technological University

**STUDY OF THE INFLUENCE OF RAPESEED OIL ON BITUMEN AGING
BY IR SPECTROSCOPY**

The article considers the issues of improving the durability of asphalt concrete pavements by increasing the resistance of bitumen to aging. The purpose of the work was to study aging of bitumen and to search for components of bitumen binder that provide effective inhibition of aging processes. Thermo- and photo-oxidative aging of bitumen binder containing rapeseed oil as a plasticizing agent has been studied. Regularities in the change in the structural-group composition of binders during thermo- and photo-oxidative aging using IR spectroscopy have been established. It has been shown that with an increase in the duration of ultraviolet irradiation, products of thermo-oxidative aging accumulate in the bitumen. This is confirmed by an increase in the carbonyl and sulfoxide indices of the binder, characterizing the presence of oxygen-containing and sulfoxide groups in the bitumen. An increase in the content of rapeseed oil in bitumen leads to a decrease in the carbonyl and sulfoxide indices, i.e. inhibition of thermo- and photo-oxidation processes is observed. It is shown that introduction of rapeseed oil into bitumen allows to reduce the rate of oxidation reaction, carboxylation and other chemical transformations, leading to the change of structural-group composition of the binder. It is determined that the optimal concentration of rapeseed oil for introduction into bitumen for the purpose of inhibiting oxidation processes is 5% by weight, at this concentration an increase in resistance to thermal-oxidative aging is observed and the necessary quality characteristics of bitumen binders are provided.

Keywords: bitumen binder, rapeseed oil, aging, structural-group composition, thermal-oxidative stability, IR spectroscopy.

For citation: Dubrova M. V., Shrubok A. O. Study of the influence of rapeseed oil on bitumen aging by IR spectroscopy. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2025, no. 2 (295), pp. 50–56 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-2669-2025-295-7.

Введение. Известно, что эксплуатационные характеристики и долговечность асфальтобетонных покрытий в основном определяются свойствами вяжущего компонента, в качестве которого чаще всего используют нефтяной битум. Битум в составе асфальтобетонной смеси подвержен воздействию различных атмосферных факторов, таких как перепады температур, взаимодействие с кислородом воздуха, действие ультрафиолетового излучения, источником которого является солнечный свет, в результате чего происходят необратимые изменения первоначально на поверхности материала, но с течением времени они протекают и в более глубоких слоях. Битум – связующий и герметизирующий материал – особенно восприимчив к таким воздействиям. Совокупность данных факторов вызывает так называемое старение битума, в результате чего он теряет свои вяжущие свойства, а это, в свою очередь, приводит к разрушению дорожного покрытия. Ультрафиолетовое излучение (УФ-излучение) интенсифицирует реакции окисления углеводородов битума, что обуславливает накопление в его объеме продуктов окисления и образование конденсированных ароматических структур. В результате фотоокислительного старения в битуме накапливаются карбоновые кислоты, эфиры, алифатические спирты, продукты деструкции и реструктуризации ароматических систем. Исследования старения битума в объеме показали, что превращение ароматических соединений в смолы и асфальтены оказывает влияние на коллоидную стабильность вяжущего [1]. В процессе старения битум теряет свои адгезионные и когезионные свойства, благодаря которым он связывает и обеспечивает структурную целостность асфальтобетонного покрытия при постоянных и переменных нагрузках. Старение битума связано с активным протеканием реакций окисления на поверхности вяжущего и в его объеме. Известно [1], что одним из путей решения данной проблемы является введение в состав битумного вяжущего антиоксидантов, которые могут взаимодействовать с алкильными радикалами, начинающими цепи окисления, предотвращая образование этих цепей, с гидроперекисями, которые представляют радикалы, препятствуя разветвлению окислительных цепей, а также со свободными радикалами типа $RO\cdot$ и $ROO\cdot$ с образованием малоактивных радикалов, неспособных продолжать окислительную цепь. Замедление реакций окисления позволяет обеспечить сохранение качественных характеристик вяжущего в течение длительного времени и тем самым увеличить срок службы асфальтобетонного покрытия. Таким образом, исследования, направленные на изучение процессов термоокисли-

тельного старения битума и поиск компонентов битумного вяжущего, обеспечивающих ингибирование процессов старения, являются актуальными как с научной, так и с практической точек зрения.

Основная часть. Ввиду постепенных изменений вязкоупругих свойств вяжущего, вызванных химическими превращениями в процессе старения, битум приобретает повышенную хрупкость и твердость, что приводит к образованию неровностей и растрескиваний дорожного покрытия. Чрезмерное отвердевание битума, связанное с накоплением продуктов окисления и деструкции, можно уменьшить посредством использования пластифицирующих и омолаживающих агентов, которые из-за своей более низкой вязкости могут способствовать замедлению процессов старения. Для оценки изменения состава битума при термоокислительном старении и облучении УФ-излучением использовали ИК-спектроскопию. Выбор этого метода анализа обусловлен тем, что он позволяет достаточно точно фиксировать характер химических превращений, происходящих в результате старения вяжущего, посредством сравнительной оценки содержания в битуме определенных функциональных групп. В ряде работ [2–4] показано, что биомасла и продукты их переработки могут использоваться в качестве пластифицирующих и восстанавливающих агентов, замедляющих старение битумных вяжущих, а следовательно, способствующих увеличению срока службы дорожного полотна. Такими компонентами могут выступать биокомпоненты из доступного технического растительного сырья или биотходы из различных отраслей промышленности.

Целью данного исследования являлось изучение влияния добавок рапсового масла в битум на его фото- и термоокислительное старение.

В качестве объектов исследования были изучены битумные вяжущие, полученные путем смешения битума марки БНД 70/100 с рапсовым маслом в количестве 5, 10 мас. %. Перемешивание осуществлялось с помощью лопастной мешалки (600 об/мин) при $140 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 30 мин. Характеристика битума марки БНД 70/100 представлена в табл. 1. На рис. 1 приведен ИК-спектр битума, на котором явно выражены пики полос поглощения при 2852, 2922 и 2950 см^{-1} , соответствующие колебаниям C–H-связей в алканах, алкенах и ароматических соединениях.

Таблица 1

Характеристика битума

Характеристика	Значение
Пенетрация при 25°C , 0,1 мм	73
Температура размягчения, $^\circ\text{C}$	49,5
Температура хрупкости, $^\circ\text{C}$	–20,3

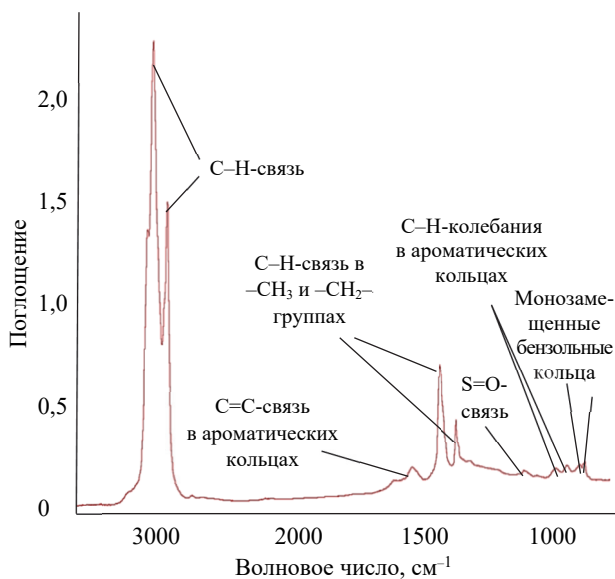


Рис. 1. ИК-спектр битума

Валентные колебания $C=C$ -группы в области 1600 см^{-1} указывают на наличие ароматических колец. Пики в области $1350\text{--}1470\text{ см}^{-1}$ связаны с деформационными колебаниями связей $C-H$ в метильных $-CH_3$ и метиленовых $-CH_2-$ группах. Пик полосы поглощения при 1030 см^{-1} свидетельствует о наличии связи $S=O$ сульфоксидных групп.

Пики полос поглощения в области $700\text{--}900\text{ см}^{-1}$ на ИК-спектре битума связаны с колебаниями ароматических структур и деформационными колебаниями связи $C-H$. Пики в области $700\text{--}750$, 812 , 868 см^{-1} указывают на наличие моно- и дизамещенных бензольных колец.

Рапсовое масло – это растительное масло, получаемое из семян рапса, состоящее преимущественно из мононенасыщенных жирных кислот и триглицеридов – сложных эфиров жирных кислот. В Республике Беларусь рапсовое масло является возобновляемым и дешевым источником сырья, которое широко используется в производстве биодизеля, поверхностно-активных веществ, эпоксицированных масел, красок и лаков, а также в качестве смазочного и пластифицирующего агента. Рапсовое масло ввиду своего состава и доступности может рассматриваться как потенциальный компонент для улучшения качественных характеристик битума. На рис. 2 приведен ИК-спектр используемого рапсового масла.

Пики полос поглощения в области $3000\text{--}3100\text{ см}^{-1}$ присущи ненасыщенным связям $C=C$ жирных кислот (олеиновой, линолевой и линоленовой) рапсового масла. Пики в области 2925 и 2854 см^{-1} связаны с валентными колебаниями $C-H$ -связей в метиленовых $-CH_2-$ и метильных $-CH_3$ -группах. Пик при длине волны 1745 см^{-1} соответствует валентным колебаниям карбонильной группы $C=O$ сложных эфиров, которые являются

основным компонентом триглицеридов. Пик в области 1465 см^{-1} указывает на деформационные колебания $C-H$ -связей в метиленовых группах, а при 1165 см^{-1} – на валентные колебания $C-O$ -связей в сложноэфирных группах. Пик около 722 см^{-1} соответствует колебаниям $C-H$ -связей в длинных углеводородных цепях жирных кислот.

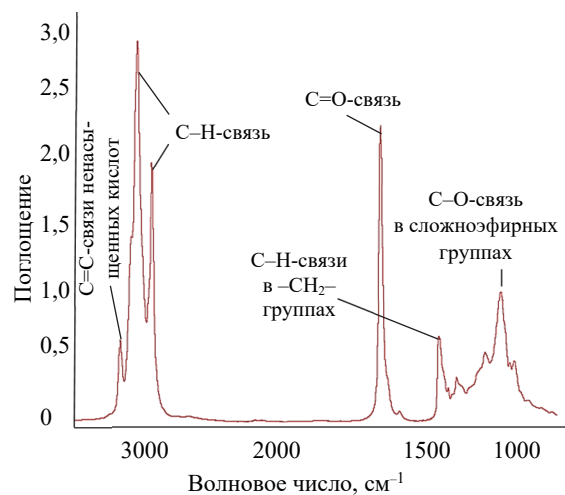


Рис. 2. ИК-спектр рапсового масла

Традиционным методом оценки способности битума к термоокислительному старению является определение изменения его свойств после прогрева. Прогрев битума осуществляли в соответствии с ГОСТ 18180–72 от 01.12.2009 «Битумы нефтяные. Метод изменения массы массы после прогрева» следующим образом: навеску битума заливали в чашки и устанавливали на горизонтальную решетку нагретого сушильного шкафа. Прогрев битума продолжали в течение 5 ч при температуре 163°C . Оценку фотохимического старения битума выполняли так: навеску битума заливали в чашки Петри таким образом, чтобы слой битума в чашке составлял $8\text{--}10\text{ мм}$, и устанавливали под источник ультрафиолетового излучения. Влияние УФ-излучения на битум оценивали по изменению его свойств и структурно-группового состава после облучения в течение 24, 48 и 96 ч. Структурно-групповой состав определяли по ИК-спектрам, снятым в области $4000\text{--}400\text{ см}^{-1}$ на Фурье-спектрометре ФСМ 1202 в тонкой пленке методом на просвет на кристалле бромиды калия. Для усредненной молекулы битума устанавливали площади полос поглощения (S) при длинах волн 725 , 745 , 815 , 864 , 1030 , 1380 , 1465 , 1600 , 1700 , 2862 , 2923 , 2953 см^{-1} . Сумму площадей пиков полос поглощения рассчитывали по формуле

$$\begin{aligned} \sum S = & S_{725} + S_{725} + S_{815} + S_{864} + \\ & + S_{1030} + S_{1380} + S_{1465} + S_{1600} + \\ & + S_{1700} + S_{2862,2923,2953}. \end{aligned} \quad (1)$$

Оценку условного содержания углеводородных компонентов определенной структуры проводили путем расчета спектральных коэффициентов, являющихся отношением площадей пиков полос поглощения при длинах волн 725, 745, 815, 1380, 1465 см^{-1} , которые характерны для деформационных колебаний $\text{C}=\text{C}$ -связи ароматического кольца (1600 см^{-1}), неплоских деформационных колебаний $-\text{CH}_3$ - и $-\text{CH}_2$ - групп (1380 и 1465 см^{-1}), деформационных колебаний метиленовых групп в алкильных фрагментах, содержащих не менее четырех атомов углерода (725 см^{-1}).

Для оценки влияния вводимого рапсового масла на структурно-групповой состав получаемых вяжущих рассчитывали следующие коэффициенты:

– карбонильный индекс

$$C_{\text{карб.}} = \frac{S_{1700}}{\sum S}; \quad (2)$$

– коэффициент ароматичности

$$C_{\text{аром.}} = \frac{S_{1600}}{\sum S}; \quad (3)$$

– сульфоксидный индекс

$$C_{\text{сульф.}} = \frac{S_{1030}}{S_{1380} + S_{1600}}; \quad (4)$$

– коэффициент разветвленности алканов

$$C_{\text{разветвл.}} = \frac{S_{1380}}{S_{725}}. \quad (5)$$

Известно [5–8], что степень старения битумных вяжущих в составе асфальтобетонных покрытий можно охарактеризовать по содержанию в них карбонильных и сульфоксидных функциональных групп. После выдерживания в течение 5 ч при повышенной температуре в битуме наблюдается увеличение карбонильного и сульфоксидного индекса в 4,6 и 1,4 раза по сравнению с исходным битумом, что указывает на развитие реакций термоокислительного старения. Также отмечается возрастание индекса ароматичности в 2 раза, что

говорит об образовании ароматических структур в результате реакций окисления и сшивания. Наблюдаемые изменения могут быть объяснены активным протеканием реакций окисления и карбоксилирования, что приводит к образованию и накоплению в битуме новых карбоксильных и сульфоксидных соединений. Образцы вяжущего, содержащие рапсовое масло в количестве 5 и 10 мас. %, также подвергались термоокислению в течение 5 ч с целью установления закономерностей влияния масла на скорость протекания реакций окисления в битуме. Было установлено, что введение рапсового масла в битум позволяет снизить скорость реакции окисления, карбоксилирования и другие химические превращения, приводящие к изменению структурно-группового состава вяжущего (табл. 2). При введении рапсового масла в битум в количестве 5 % мас. карбонильный индекс и индекс ароматичности снижается в 4 и 2 раза соответственно, при этом изменение сульфоксидного индекса практически не наблюдается.

Увеличение концентрации рапсового масла в битуме до 10 мас. % способствует снижению карбонильного индекса и индекса ароматичности вяжущего в 3,5 и 2 раза соответственно. Таким образом, продемонстрировано, что рапсовое масло в составе битумного вяжущего оказывает ингибирующий эффект на процессы термоокислительного старения.

В работах [9–13] продемонстрировано, что битумы с высоким содержанием разветвленных алканов проявляют хорошую устойчивость к механическому и термическому воздействию, а следовательно, меньше подвержены процессам старения. Было установлено, что после выдерживания битума при повышенной температуре коэффициент разветвленности алканов незначительно уменьшается в 1,5 раза (табл. 2). Битумные вяжущие, содержащие рапсовое масло в количестве 5 и 10 мас. %, обладают более высокими коэффициентами разветвленности алканов по сравнению с чистым битумом (в 1,5 и 1,4, раза соответственно), что подтверждает устойчивость полученных вяжущих к температурным воздействиям окружающей среды.

Таблица 2

Изменение структурно-группового состава битумов после старения

Показатель	Битум		Битум + рапсовое масло 5 мас. %		Битум + рапсовое масло 10 мас. %	
	Продолжительность термоокисления, ч					
	0	5	0	5	0	5
Коэффициент ароматичности, $\times 10^{-2}$	1,8	3,9	2,5	2,0	1,8	1,9
Карбонильный индекс, $\times 10^{-3}$	7,2	33,0	16,0	8,0	11,0	9,6
Сульфоксидный индекс, $\times 10^{-2}$	21,0	30,0	28,0	24,0	29,0	25,0
Коэффициент разветвленности алканов	2,6	1,7	2,2	2,4	2,5	2,4

Таблица 3

Изменение структурно-группового состава битумов после УФ-облучения

Показатель	Битум				Битум + рапсовое масло 5 мас. %				Битум + рапсовое масло 10 мас. %			
	Продолжительность УФ-облучения, ч											
	0	24	48	96	0	24	48	96	0	24	48	96
Коэффициент ароматичности, $\times 10^{-2}$	1,8	3,7	3,0	2,8	2,7	2,6	2,2	2,0	1,8	1,3	1,6	2,2
Карбонильный индекс, $\times 10^{-3}$	7,0	25,0	22,0	16,0	16,0	15,0	11,0	10,0	11,0	5,0	6,0	13,0
Сульфоксидный индекс, $\times 10^{-2}$	21,0	24,0	24,0	27,0	28,0	15,0	13,0	23,0	29,0	10,0	9,0	23,0

В условиях эксплуатации дорожного полотна изменение свойств вяжущего также происходит под действием УФ-излучения. Исследование влияния УФ-излучения на структурно-групповой состав битума выявило, что с увеличением времени воздействия ультрафиолетового излучения наблюдается рост карбонильного индекса, а это свидетельствует об образовании и накоплении в битуме веществ с реакционноспособными группами, способными к дальнейшему окислению (табл. 3).

Установлено, что введение рапсового масла в битумное вяжущее оказывает влияние на скорость изменения карбонильного индекса. При введении масла в количестве 10 мас. % в битум наблюдается снижение карбонильного индекса вяжущего в 3,7 раза по сравнению с битумом, не содержащим рапсовое масло. Это свидетельствует о том, что присутствие рапсового масла в битуме снижает скорость его окисления.

Изменение карбоксильного индекса, вероятно, обусловлено химическим составом рапсового масла: ненасыщенные жирные кислоты и их сложные эфиры взаимодействуют с образующимися в процессе окисления битума свободными радикалами. Установлено, что оптимальная концентрация рапсового масла в битуме составляет 5 мас. %, так как при этой концентрации наблюдается ингибирование процессов окисления, что подтверждается снижением количества карбонильных групп в 1,5 раза в битумном вяжущем как при воздействии высоких температур, так и при длительном УФ-облучении.

В процессе фотохимического старения с увеличением продолжительности облучения наблюдается возрастание сульфоксидного индекса. Это обусловлено накоплением в нефтяном битуме сульфоксидных групп, выступающих источником свободных радикалов, которые интенсифицируют процессы окисления, что, в свою очередь, приводит к старению и ухудшению качественных характеристик битумного вяжущего.

Введение масла в количестве 5 мас. % в битум приводит к уменьшению сульфоксидного

индекса в 1,6 раза после 24 ч УФ-облучения и в 2 раза – через 48 ч. Ингибирующее действие рапсового масла, вероятно, обусловлено образованием положительно заряженного сульфониевого иона при взаимодействии жирных кислот рапсового масла с кислородом сульфоксидной группы [14, 15].

Закключение. Исследование термо- и фотоокислительного старения битумного вяжущего, содержащего рапсовое масло, показало возможность применения его как компонента, ингибирующего процессы старения в битуме. Закономерности изменения структурно-группового состава вяжущих в процессе термо- и фотоокислительного старения определены методом ИК-спектроскопии. Установлено, что в ходе данных процессов в битуме накапливаются продукты окисления.

При старении битума на его ИК-спектрах наблюдается возрастание карбонильного и сульфоксидного индексов, характеризующих наличие в битуме кислородсодержащих и сульфоксидных групп. Увеличение содержания рапсового масла в битуме приводит к снижению карбонильного и сульфоксидного индексов, т. е. наблюдается ингибирование процессов термо- и фотоокисления. Показано, что введение рапсового масла в битум позволяет снизить скорость реакции окисления, карбоксилирования и других химических превращений, приводящих к изменению структурно-группового состава вяжущего. Определено, что оптимальной концентрацией рапсового масла для введения в битум с целью ингибирования процессов окисления считается 5 мас. %, при этой концентрации наблюдается возрастание стойкости к термоокислительному старению, а также обеспечиваются необходимые качественные характеристики и битумных вяжущих.

Работа выполнена в рамках государственного задания 6.6 ГПНИ «Материаловедение, новые материалы, конструкции, технологии», подпрограмма 8.6 «Строительные материалы, конструкции, технологии» (2021–2025 гг.).

Список литературы

1. Understanding the bitumen ageing phenomenon: A review / R. Tauste [et al.] // Construction and Building Materials. 2018. No. 192. P. 593–609.

2. Performance evaluation of aged asphalt rejuvenated with various bio-oils based on rheological property index / J. Wang [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. 2023. No. 385. P. 135593.
3. Review on the properties and mechanisms of asphalt modified with bio-oil and biochar / X. Zhou [et al.] // *Journal of Road Engineering*. 2024. No. 4. P. 421–432.
4. Performance of waste plastic bio-oil as a rejuvenator for asphalt binder / N. Sabzoi [et al.] // *Science of The Total Environment*. 2022. No. 828. P. 154489.
5. Слепцова О. В., Нгуен Ф. Н. Старение битума под действием ультрафиолетового излучения // *Дорожно-строительные материалы*. 2015. № 3. С. 39–41.
6. Гордеева И. В. Исследование процесса старения битумных вяжущих методом ИК-Фурье-спектроскопии // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2020. № 1. С. 23–30.
7. Saannibe C., Pavoine A., Chailleux E. Evaluation of the potential use of waste sunflower and rapeseed oils-modified natural bitumen as binders for asphalt pavement design // *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2016. No. 9. P. 368–375.
8. Zaumanis M., Malick R., Frank R. Evaluation of different recycling agents for restoring aged asphalt binder and performance of 100% recycling asphalt // *Materials and structures*. 2014. No. 48. P. 2475–2488.
9. Petersen J. Chemical composition of asphalt as related to asphalt durability: State of the art // *Transportation Research Record*. 1984. No. 999. P. 13–30.
10. Lesueur D. The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2009. Vol. 145, no. 1–2. P. 42–82.
11. Petersen J., Harnsberger P. Asphalt aging: Dual oxidation mechanism and its interrelationships with asphalt composition and oxidative age hardening // *Transportation Research Record*. 1998. No. 1638. P. 47–55.
12. Yen T. Structure of petroleum asphaltene and its significance // *Energy Sources*. 1974. Vol. 1, no. 4. P. 447–463.
13. Herrington P. R., Alabaster D. J. Oxidation of bitumen: Molecular characterization and influence on rheological properties // *Energy & Fuels*. 2008. No. 22. P. 2596–2605.
14. Zhang H., Yu J., Wu S. Effect of waste cooking oil on the properties of aged bitumen // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2012. No. 24. P. 746–750.
15. Investigation on physical properties of waste cooking oil – Rejuvenated bitumen binder / H. Asli, [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 37. P. 398–405.

References

1. Tauste R., Moreno-Navarro F., Sol-Sánchez M., Rubio-Gámez M. C. Understanding the bitumen ageing phenomenon: A review. *Construction and Building Materials*, 2018, no. 192, pp. 593–609.
2. Wang J., Songtao L., Liu J., Peng X., Lu W., Wang Z., Xie N. Performance evaluation of aged asphalt rejuvenated with various bio-oils based on rheological property index. *Journal of Cleaner Production*, 2023, no. 385. P. 135593.
3. Zhou X., Zhang Z., Wang H., Chen M., Wu S., Xu S., Zhou X., Ran M., Li L., Lu G., Ma Z. Review on the properties and mechanisms of asphalt modified with bio-oil and biochar. *Journal of Road Engineering*, 2024, no. 4, pp. 421–432.
4. Sabzoi N., Humair A. B., Muhammad Jamal, Srinivasan M., Filippo G. Performance of waste plastic bio-oil as a rejuvenator for asphalt binder. *Science of The Total Environment*, 2022, no. 828. P. 154489.
5. Sleptsova O. V., Nguyen F. N. Aging of bitumen under the action of ultraviolet radiation. *Dorozhno-stroitel'nyye materialy* [Road Construction Materials], 2015, no. 3, pp. 39–41 (In Russian).
6. Gordеева И. В. Study of the aging process of bitumen binders by FT-IR spectroscopy. *Klei. Germetiki. Tekhnologii* [Adhesives. Sealants. Technology], 2020, no. 1, pp. 23–30 (In Russian).
7. Saannibe C. S., Pavoine A., Chailleux E. Evaluation of the potential use of waste sunflower and rapeseed oils-modified natural bitumen as binders for asphalt pavement design. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2016, no. 9, pp. 368–375.
8. Zaumanis M., Malick R. B., Frank R. Evaluation of different recycling agents for restoring aged asphalt binder and performance of 100% recycling asphalt. *Materials and structures*, 2014, no. 48, pp. 2475–2488.
9. Petersen J. C. Chemical composition of asphalt as related to asphalt durability: State of the art. *Transportation Research Record*, 1984, no. 999, pp. 13–30.
10. Lesueur D. The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2009, vol. 145, no. 1–2, pp. 42–82.
11. Petersen J. C., Harnsberger P. M. Asphalt aging: Dual oxidation mechanism and its interrelationships with asphalt composition and oxidative age hardening. *Transportation Research Record*, 1998, no. 1638, pp. 47–55.
12. Yen T. F. Structure of petroleum asphaltene and its significance. *Energy Sources*, 1974, vol. 1, no. 4, pp. 447–463.

13. Herrington P. R., Alabaster D. J. Oxidation of bitumen: Molecular characterization and influence on rheological properties. *Energy & Fuels*, 2008, no. 22, pp. 2596–2605.
14. Zhang H., Yu J., Wu S. Effect of waste cooking oil on the properties of aged bitumen. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2012, vol. 24, pp. 746–750.
15. Asli H., Ahmadinia E., Zargar M., Karim M. Investigation on physical properties of waste cooking oil – Rejuvenated bitumen binder. *Construction and Building Materials*, 2012, no. 37, pp. 398–405.

Информация об авторах

Дуброва Мария Владимировна – аспирант кафедры нефтегазопереработки и нефтехимии. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: mdubrova69@gmail.com

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

Information about the authors

Dubrova Maryia Vladimirovna – PhD student, the Department of oil and gas processing and petrochemistry Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mdubrova69@gmail.com

Shrubok Aliaksandra Olegovna – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Prifessor, the Department of Oil and Gas Processing and Petroleum Chemistry. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shrubok@belstu.by

Поступила 24.02.2025