

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 2. С. 185–197.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (2): 185–197.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.7/8: 677.044.132

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-2-185-197

EDN: RMCVHL

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТИ СМЕСЕВЫХ ПЛАСТИФИКАТОРОВ – ОСТАТОЧНЫХ ПРОДУКТОВ ЛЕСОХИМИИ

**Илья Алексеевич Халикин¹, Иван Михайлович Рожков²,
Ван Линьфан³, Илья Андреевич Ключников⁴,
Николай Александрович Лушников⁵,
Дмитрий Юрьевич Небрятенко^{1,5,6}**

¹Московский государственный строительный университет,
г. Москва, Россия

²Научно-исследовательский институт
транспортно-строительного комплекса, г. Москва, Россия

³Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

⁴Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), г. Москва, Россия

⁵Российский университет транспорта, г. Москва, Россия

⁶Российский химико-технологический университет
имени Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия

Аннотация. Актуальность. Истощение легкодоступных запасов нефти приводит к необходимости уделять все большее внимание изучению возможности замещения используемых в дорожном строительстве нефтепродуктов на компоненты растительного происхождения. Важно отметить, что получение таких компонентов является экологически полезным, поскольку расширение лесных массивов позволяет компенсировать потери кислорода вследствие интенсивной человеческой деятельности. Продукция лесного хозяйства широко востребована, объёмы лесопереработки ежегодно растут, но параллельно с ними увеличивается и количество производимых отходов, а следовательно, и объёмы их утилизации путем сжигания.

Основные технологии переработки и соответствующие им товарные продукты лесохимии были разработаны более 50–70 лет назад, и их модернизация весьма затратна. Существующие сегодня частные примеры нетрадиционного использования остаточных продуктов сульфатно-целлюлозного производства точно обозначают перспективные направления для развития данного сегмента их применения, но не снимают всю остроту проблемы. Обширные запасы древесной щепы в российских регионах и существенный объём сточных вод целлюлозных производств подчеркивают важность проведения исследований в указанном направлении.

Основная часть данной работы посвящена систематизированному исследованию и анализу качественных показателей товарных и нетоварных продуктов лесохимии с целью оценки возможности рекомендовать их для использования в качестве модификаторов технологических и эксплуатационных свойств битумных вяжущих. Это одно из потенци-

альных направлений полезного использования лесохимических остатков, которое является примером продолжения технологического передела продуктов лесопереработки, но уже в дорожно-строительной отрасли.

Цель работы – выявление возможности применения товарных продуктов лесохимии и их смесей для дальнейшего изучения целенаправленного регулирования комплекса физико-механических показателей дорожных вяжущих.

Методы. Методом гравиметрического анализа проведена сопоставительная оценка термостабильности как для товарных и нетоварных продуктов, так и для их смесей при различном соотношении компонентов.

Результаты. Исследования подтвердили потенциальную возможность применения остаточных продуктов лесохимического передела, в том числе их смесей, для корректировки технических, технологических и эксплуатационных характеристик битумных вяжущих различных составов.

Ключевые слова: битумы нефтяные дорожные, пек талловый, масло легкое талловое, потеря массы при термостатировании

Благодарность: авторы выражают благодарность ООО «Газпромнефть-Битумные материалы» за предоставление образцов товарной продукции и всестороннюю помощь в проведении исследований.

Для цитирования: Халикин И.А., Рожков И.М., Ван Линьфан, Ключников И.А., Лушников Н.А., Небрatenко Д.Ю. Исследование термостабильности смесевых пластификаторов – остаточных продуктов лесохимии // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 2. С. 185–197. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-2-185-197. EDN: RMCVHL

ORIGINAL ARTICLE

THERMAL STABILITY OF MIXED PLASTICIZERS, RESIDUAL PRODUCTS OF FOREST CHEMISTRY

Ilya A. Khalikin¹, Ivan M. Rozhkov², Wang Linfan³,
Ilya A. Klyuchnikov⁴, Nikolai A. Lushnikov⁵, Dmitry Yu. Nebratenko^{1,5,6}

¹The National Research Moscow State University of Civil Engineering,
Moscow, Russia

²Research Institute of Transport and Construction Complex, Moscow, Russia

³Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

⁴The Federal Road Agency (Rosavtodor), Moscow, Russia

⁵Russian University of Transport, Moscow, Russia

⁶D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia

Abstract. This work studies and analyzes qualitative indicators of commodity and non-commodity products of forest chemistry in order to recommend them for using as modifiers of technological and operational properties of bitumen binders. This is one of many potential areas for a beneficial use of forest chemical residues. It is an example of technological conversion of timber processing products in the road construction industry.

Purpose: The aim of the work is to identify the possibility of using forest chemistry commercial products and their mixtures for further studying control for physical and mechanical parameters of road binders.

Methodology: A comparative analysis of thermal stability of both commodity and non-commodity products and their mixtures at different component ratio based on the thermogravimetric analysis.

Research findings: The potential use of residual products is confirmed for forest chemical processing, including their mixtures to correct technological and operating parameters of bituminous binders of various compositions.

Keywords: petroleum asphalt, tall oil pitch, light tall oil, thermostat weight loss

Acknowledgement: The authors express their gratitude to ООО “Gazpromneft-Bitumen Materials” for providing samples of commercial products and comprehensive assistance in conducting research.

For citation: Khalikin I.A., Rozhkov I.M., Van Lin'fan, Klyuchnikov I.A., Lushnikov N.A., Nebratenko D.Yu. Thermal Stability of Mixed Plasticizers, Residual Products of Forest Chemistry. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (2): 185–197. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-2-185-197. EDN: RMCVHL

Введение

Традиционные окисленные битумы нефтяные дорожные вязкие (БНД) и полимерно-битумные вяжущие на их основе (ПБВ) являются наиболее распространенными материалами, применяемыми в качестве связующих в асфальтобетонных смесях [1, 2, 3]. Большинство битумных связующих, используемых для дорожных работ, получают из ископаемого сырья [4, 5, 6]. Общее потребление битума в Европе остается высоким, относительно стабильным и варьируется на уровне 10–12 млн т в год [7]. По данным Росстата, в 2022 г. в России аналогичный показатель составлял 7,9 млн т [8]. Кроме того, прогнозируется, что для ликвидации разрушений и износа покрытий в связи с интенсификацией движения крупнотоннажного наземного колесного транспорта внутри страны спрос на битум и асфальтобетонные смеси продолжит расти и будет обусловлен увеличением расходов на строительство и содержание дорог.

Рост объемов дорожно-строительных работ, в сочетании со стремлением минимизировать использование для указанной цели ископаемого нефтяного сырья, привел во всем мире к повышению интереса к вяжущим из альтернативных источников сырья, особенно из возобновляемых природных материалов животного и/или растительного происхождения, обобщенно именуемых биовяжущими.

Биовяжущие представляют собой полную или частичную альтернативу традиционному нефтяному битуму. Они изготавливаются на основе возобновляемых источников сырья, не связанных непосредственно с нефтью. При этом их производство не влияет на производство продуктов питания, поэтому они имеют очевидные экологические и неочевидные экономические выгоды. Их можно производить из различных источников, включая растительные масла, водоросли, лосиный и свиной навоз, продукты лесопереработки и лесохимии [9, 10, 11]. Биовяжущие не только обладают потенциалом снижения спроса на нефтяной битум, но также продемонстрировали положительное влияние на эксплуатационные характеристики дорожных покрытий в зависимости от их состава и региона расположения дорожных объектов. Они могут быть получены и использованы практически повсеместно, по всей территории РФ, причем прежде всего там, где доставка нефтяного сырья затруднительна [11, 12]. Поэтому им, как эффективной альтернативе или дополнительной составляющей нефтяных вяжущих в дорожном строительстве, уделяется все больше внимания.

Биомасса включает растительные масла и побочные жидкие или вязкие органические остатки [13]. На сегодняшний день с этим типом материалов проведен ряд исследований и имеются разработки, суть которых заключается в основном в их физическом смешении и процессах химической модификации, например, переэтерификации растительного масла и полимеризации канифоли [14, 15]. Применение биогенных источников для производства биосвязующих может помочь сократить выбросы и перенаправить лесоматериалы и продукты их переработки от сжигания на устойчивое и эффективное потребление. Переработка отходов может свести к минимуму количество ценных органических соединений, отправляемых на свалку, и сократить выбросы парниковых газов путем использования переработанных растительных отходов для замещения традиционных битумных вяжущих [16, 17].

Учитывая рост глобального потребления нефтепродуктов и углубления процессов нефтепереработки вплоть до твердых остатков (кокса), также важно отметить, что сжиженная биомасса не сможет удовлетворить все потребности в вяжущих в полном объеме, поскольку существует множество других конкурирующих видов ее использования, включая растущий спрос на производство биотоплива: биодизеля и биоэтанола [18].

Можно выделить три варианта применения биокомпонентов в составе традиционных нефтяных битумов [19]:

- 1) непосредственно в качестве пластификаторов или мягчителей (объем вводимого материала растительного происхождения в состав нефтяного битума не превышает 7–10 %);
- 2) в качестве вязких компонентов, омолаживателей и активных заполнителей (замещение объема битума биовяжущим на уровне 20–75 %);
- 3) в роли альтернативного вяжущего (90–100%-я замена битума).

На современном этапе большинство исследований сосредоточено на применении биовяжущих непосредственно в качестве пластификаторов или мягчителей. При этом суммарный объем замещения нефтяных компонентов растительными не превышает 10 массовых процентов. Возможно, это связано с увеличением неопределенности реологических свойств, придаваемых биокомпонентами итоговому вяжущему при использовании их в большем количестве [20, 21]. Исследования по применению биовяжущих в качестве наполнителей битума или полной альтернативы также важны, поэтому существует необходимость дальнейшего изучения этих материалов, чтобы максимизировать их использование в дорожной сфере.

В настоящей работе исследованы растительные компоненты – продукты лесохимии (пек талловый и легкое талловое масло), а также их двойные смеси. Цель работы – выявление возможности применения товарных продуктов лесохимии и их смесей для дальнейшего изучения целенаправленного регулирования комплекса физико-механических показателей дорожных вяжущих.

Объекты и методы

В качестве базового компонента в исследовании использовался пек талловый (ТП) – многотоннажный побочный продукт сульфатно-целлюлозного производства [22]. При дистилляции таллового масла в кубовом остатке накоп-

ливаются высококипящие нейтральные вещества. В смеси с нелетучими и перекисленными продуктами они образуют товарный продукт переменного состава, известный как пек талловый. Являясь доступным и относительно дешевым возобновляемым сырьем растительного происхождения и обладая рядом ценных свойств, пек талловый в настоящее время не находит достаточно квалифицированного применения, и значительная его часть утилизируется (сжигается). Использованный в работе пек талловый соответствует СТО 16217983-006–2018, состав его смеси представлен в табл. 1. Средняя молекулярная масса таллового пека составляет 560 а. е. м.

Таблица 1

Компонентный состав таллового пека и легкого таллового масла [23]

Table 1

Mixture composition of tall oil pitch and light tall oil

Наименование показателя	Содержание, масс. %	
	в ТП	в ЛТМ
Жирные кислоты	1–20	45–60
Смоляные кислоты	10–20	2–15
Окисленные продукты	14–20	5–10
Неомыляемые вещества	25–40	25–50

Талловые масла (ТМ) – побочные продукты сульфатно-целлюлозного производства – представляют большой интерес для лесохимических и целлюлозно-бумажных предприятий [22]. Масло талловое легкое (ЛТМ) – головной погон при ректификации таллового масла. Это маслянистая жидкость или кашеобразная масса, прозрачная при 80 °С. Компонентный состав легкого таллового масла представлен в табл. 1. ЛТМ практически не растворяется в воде, но хорошо растворяется в органических растворителях и медленно окисляется на воздухе [23, 24, 25]. Использованное в данной работе ЛТМ выпускается в соответствии с СТО 16217983-007–2018 и при комнатной температуре имеет специфический запах, характерный для меркаптанов и сульфидов.

Легкое талловое масло, с одной стороны, может быть дополнительным источником получения ароматических углеводородов, с другой стороны, легкие масла возможно использовать в качестве разбавителя пека таллового [24, 25]. Изучение последнего варианта является составной частью целевой задачи данного исследования.

Паспортные показатели таллового пека и легкого таллового масла представлены в табл. 2.

Выбор в качестве пластифицирующих компонентов для нефтяного дорожного битума ТП и ЛТМ в том числе определен тем обстоятельством, что на текущий момент в России не существует достаточно технологичного способа эффективной утилизации этих крупнотоннажных компонентов лесохимии, суммарный выход которых при переработке остатков сульфатно-целлюлозного производства может составлять до 45–60 %.

Таблица 2

Паспортные показатели таллового пека и легкого таллового масла

Table 2

Specified parameters of tall oil pitch and light tall oil

Наименование показателя	ТП		ЛТМ	
	Норма марки А по СТО 16217983-006-2018	Факт	Норма по СТО 16217983-007-2018	Факт
Кислотное число, мг КОН на 1 г продукта	Не более 60	58	Не менее 150	158
Температура размягчения, °С	Не ниже 25	31	–	–
Массовая доля смоляных кислот, %	–	–	Не более 8	3
Массовая доля воды, %	–	–	Не более 0,6	Следы
Плотность при 20 °С, г/см ³	Не менее 1,0	1,04	Не менее 0,90	0,922
Условная вязкость, с	10–50	–	–	49

Однако при приготовлении асфальтобетонных смесей (АБС) важна термостабильность связующих компонентов при повышенных температурах. Поэтому все компоненты АБС и вяжущие материалы оцениваются на предмет соответствия указанному требованию. Для проведения испытаний на термостабильность исходных продуктов переработки сырого таллового масла, а также их смесей в различных соотношениях авторами была разработана методика проведения испытаний, в основу которой положены принципы ГОСТ 18180–72 «Битумы нефтяные. Метод определения изменения массы после прогрева». Указанный стандарт распространяется на нефтяные битумы и устанавливает метод определения изменения массы битума после прогрева. Это может быть как уменьшение массы вяжущего за счет испарения летучих компонентов, так и увеличение массы битума вследствие образования новых кислородсодержащих компонентов при окислении воздухом. В данном случае в качестве исследуемых компонентов выступали исходные товарные и нетоварные продукты лесохимии, а также пять смесей пека таллового и легкого таллового масла, состав которых представлен в табл. 3.

Методика проведения испытаний на термостабильность исходных продуктов переработки сырого таллового масла, а также их смесей в различных соотношениях состояла в следующем. Каждый исследуемый компонент (ИК) заливали в две стеклянные чашки Петри (по 28 + 0,1 г в каждую) и осторожно распределяли его по дну равномерным слоем (толщиной порядка 4–5 мм).

После охлаждения ИК до комнатной температуры пробы взвешивали с погрешностью не более 0,01 г. Полученные таким образом пробы устанавливали на горизонтальную решетку сушильного шкафа, предварительно разогретого до 163 °С. Температуру дополнительно контролировали ртутным термометром. Периодически чашки с ИК вынимали из сушильного шкафа и взвешивали с погрешностью не более 0,01 г. Поскольку при установлении и извлечении проб

температура сушильного шкафа понижалась, то время испытаний отсчитывали от момента достижения в термошкафу требуемого значения – 163 °С.

Изменение массы ИК после прогрева (X) в процентах вычисляли по формуле

$$X = ((m - m_1)100)/m,$$

где m – масса ИК до прогрева, г; m_1 – масса ИК после прогрева, г.

За результат испытания принимали среднее арифметическое значение двух параллельных определений.

Результаты

Данные, полученные в ходе проведения испытаний, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Изменение массы смесей таллового пека и легкого таллового масла в ходе прогрева при 163 °С

Table 3

Mixture weight of tall oil pitch and light tall oil at 163 °C heating

Содержание в смеси, масс. %		Потеря массы смеси после прогрева, %				
ТП	ЛТМ	1 ч	2 ч	3 ч	4 ч	5 ч
100	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03
80	20	0,00	0,00	0,00	0,03	0,06
60	40	0,00	0,00	0,10	0,19	0,29
50	50	0,00	0,10	0,29	0,38	0,76
40	60	0,02	0,35	0,47	0,50	0,73
20	80	0,10	0,59	0,74	1,47	1,47
0	100	0,40	0,66	0,93	1,32	1,59

Таким образом, гравиметрическим методом была определена термостабильность ряда смесевых продуктов лесохимии при их продолжительном нахождении (от 1 до 5 ч) при повышенных температурах (163 °С).

Из данных табл. 3 следует, что возрастание убыли массы исследуемых смесей биокомпонентов наблюдается с увеличением в составе смеси количества ЛТМ. Заметные потери массы фиксируются при содержании легкого таллового масла в смеси порядка 40 %.

Активное испарение легколетучих компонентов таллового пека и легкого таллового масла продолжалось на протяжении всего эксперимента. Интенсивность и цветность образующихся при нагревании легколетучих компонентов можно оценить на рис. 1. Однако важно отметить, что, несмотря на наблюдаемое активное удаление легких фракций из состава смеси, потеря массы на горизонте 5 ч при 163 °С не является существенной и не превышает 1,0–1,5 масс. % [26, 27]. Согласно требованиям к битумным вяжущим материалам по ГОСТ Р 58400.1–2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Технические условия с учетом температур-

ного диапазона эксплуатации» и ГОСТ Р 58400.2–2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Технические условия с учетом уровней эксплуатационных транспортных нагрузок», изменение массы до 1 % является приемлемым.



Рис. 1. Интенсивное испарение летучих компонентов на этапе прогрева образцов при 163 °С

Fig. 1. Intensive evaporation of volatile components at 163 °С

Ограничение срока прогрева пятью часами объясняется тем, что разработанная методика применялась для моделирования технологического прогрева дорожного битума/ПБВ при приготовлении, транспортировке и укладке горячих дорожных асфальтобетонных смесей, которое предполагает именно пятиточасовой прогрев, следовательно, для исследования возможности потенциального применения ЛТМ в этих смесях усложнять лабораторный эксперимент применением более продолжительного нагрева было бы нецелесообразно.

В ходе органолептической оценки воздействия летучих компонентов ЛТМ, обладающих специфическим запахом, в учебно-лабораторном комплексе кафедры «Автомобильные дороги, аэродромы, основания и фундаменты» Российского университета транспорта в течение трех месяцев были проведены испытания компонентов растительного происхождения на морозостойкость (до $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$) и теплостойкость (до $+68\text{ }^{\circ}\text{C}$) в статическом режиме.

Важно отметить, что по истечении 45 сут с начала нахождения ЛТМ в открытой ёмкости при температуре, превышающей комнатную на 10–15 °С, органолептические показатели легкого таллового масла нормализовались, специфический запах пропал, а последующий прогрев при 163 °С повторного выделения легколетучих компонентов не вызывал. На рис. 2 представлен внешний вид ЛТМ при температурах: -35 , -25 и $68\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно.

Представленные изображения наглядно демонстрируют изменение агрегатного состояния ЛТМ от высоковязкого (но не кристаллизующегося) состояния до абсолютно прозрачной подвижной жидкости.



Рис. 2. Изменение агрегатного состояния ЛТМ от -35 до 68 °С
Fig. 2. Physical forms of light tall oil within -35 to 68 °С

Кроме улучшения низкотемпературных свойств смеси масел, введение в состав ТП определённого количества ЛТМ призвано было скорректировать его вязкостные показатели при традиционных температурах переработки, чтобы облегчить выполнение технологических операций по транспортировке и перекачиванию таллового пека. С учетом того, что температура порядка 163 °С является технологически значимой для процессов переработки вяжущих при приготовлении, транспортировке и применении асфальтобетонных смесей, установленная термическая стабильность смесей ТП и ЛТМ является важным техническим показателем с удовлетворительными абсолютными значениями.

Заключение

Таким образом, термогравиметрическим методом установлен факт температурной стабильности смесевых продуктов лесохимии при температурах порядка 163 °С. Показана стабильность их агрегатного состояния при долговременном промораживании до -35 °С и прогреве до $+68$ °С. Это доказывает возможность использования чистых и смесевых биовязущих – остаточных продуктов лесохимии – в качестве пластифицирующих компонентов в составе битумов нефтяных дорожных и битумных вяжущих на их основе.

В качестве направления дальнейших исследований можно выделить изучение различных модельных битумных вяжущих материалов с применением в качестве пластификатора для них остаточных продуктов лесохимии. Для указанных целей целесообразно использование современных систем моделирования технологического и эксплуатационного старения, также применяемых в дорожно-строительной отрасли.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Быстров Н.В. Нормирование свойств модифицированных битумов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 5. С. 198–203. DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-5-198-203
2. Гохман Л.М. Дорожный полимерасфальтобетон. Москва : Экон-Информ, 2017. 477 с.
3. Hunter R.N., Self A., Read J. The Shell Bitumen Handbook. 6th Edition, ICE Publishing, London, 2015. 485 p. DOI: 10.1680/tsbh.58378

4. Azari-Jafari H., Yahia A., Amor B. Life Cycle Assessment of Pavements: Reviewing Research Challenges and Opportunities // *J. Clean. Prod.* 2016. V. 1126. P. 2187–2197. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.080
5. Balaguera A., Carvajal G.I., Albertí J., Fullana-i-Palmer P. Life Cycle Assessment of Road Construction Alternative Materials: A Literature Review // *Resour. Conservation Recycling.* 2018. V. 132 (24). P. 37–48. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.01.003
6. Симчук Е.Н., Харпаев А.В., Рожков И.М. Современные подходы к моделированию старения битумных вяжущих материалов в лабораторных условиях // *Дороги и мосты.* 2022. № 2 (48). С. 274–306. EDN: HUWSYA
7. EAPA, Asphalt in Figures 2020. Brussels, European Asphalt Pavement Association, 2021. 13 p.
8. Будрис А. ЕС ограничивает поставки каучука и битума из России: какими будут последствия // *Forbes.* 01.03.2023. URL: www.forbes.ru/biznes/485436-es-ogranicivaet-postavki-kaucuka-i-bituma-iz-rossii-kakimi-budut-posledstvia (дата обращения: 16.12.2024).
9. Ingrassia L.P., Lu X., Ferrotti G., Canestrari F. Renewable materials in bituminous binders and mixtures: Speculative pretext or reliable opportunity? // *Resources, Conservation and Recycling.* 2019. V. 144. P. 209–222. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.01.034
10. Белова Н.А., Страхова Н.А. Возможность пластификации нефтяных битумов отработанными синтетическими и минеральными // *Перспективы развития строительного комплекса.* 2014. № 1. С. 93–97. EDN: SYBQXR
11. Евдокимова Н.Г., Грызина Е.В., Ялиева Э.А., Гуреев А.А. Подготовка сырья битумного производства с использованием вакуумного остатка установки висбрекинга // *Нефтегазовое дело.* 2011. № 5. С. 323–335.
12. Mahssin Z.Y., et al. Converting Biomass into Bio-Asphalt – A Review // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science.* 2021. V. 19. DOI: 10.1088/1755-1315/682/1/012066
13. Lahjiri F. Etude de l’impact physico-chimique des liants dits ”régénérants” sur la constructibilité (performance et durabilité) des enrobés recycles // *Physique. Français. Université Montpellier,* 2020. 307 p.
14. Elahi Z., et al. Waste Cooking Oil as a Sustainable Bio Modifier for Asphalt Modification: A Review // *Sustainability.* 2021. V. 13. P. 11506. DOI.org: 10.3390/su132011506
15. Доилов О.И., Снеишлов Е.Г. Полимерно-битумное вяжущее – высокотехнологическая основа для асфальта нового поколения // *Вестник ИргТУ.* 2013. № 6. С. 140–144. EDN: QCRBYJ
16. *The Eurobitume life-cycle inventory for bitumen.* Version 3.1. European Bitumen Association. 2020. V. 49.
17. Alvarez-Barajas R., et al. Bio and waste-based binders with hybrid rubberized-thermoplastic characteristics for roofing // *Polymer Testing.* 2024. V. 130. 108317. DOI: 10.1016/j.polymeresting.2023.108317
18. Zhou Y. Hydrothermal conversion of biomass to fuels, chemicals and materials: A review holistically connecting product properties and marketable applications // *Science of The Total Environment.* 2023. V. 34. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163920
19. Samieadel A., Schimmel K., Fini E.H. Comparative life cycle assessment (LCA) of bio-modified binder and conventional asphalt binder // *Clean Technologies and Environmental Policy.* 2018. V. 20. № 1. P. 191–200.
20. Aziz M.M.A., Rahman M.T., Hainin M.R., Bakar W.A. An overview on alternative binders for flexible pavement // *Construction and Building Materials.* 2015. V. 84. P. 315–319.
21. Zhang Z., Fang Y., Yang J., Li X. A comprehensive review of bio-oil, bio-binder and bio-asphalt materials: Their source, composition, preparation and performance // *J. Traffic Transp. Eng.* 2022. V. 9. № 2. P. 151–166. DOI: 10.1016/j.jtte.2022.01.003
22. Смид В.А., Дильман А.Д. Основы современного органического синтеза. Москва : БИНОМ, 2009. 750 с.
23. *Методические рекомендации по применению составленных вяжущих в покрытиях автомобильных дорог.* Москва : Союздорнии, 1980. 24 с.
24. Варанкина Г.С., Русаков Д.С., Козик П.С. Исследование процессов склеивания шпона фенолоформальдегидной смолой с использованием промежуточных продуктов сульфатно-целлюлозного производства // *Системы. Методы. Технологии.* 2016. № 2 (30). С. 120–127. DOI: 10.18324/2077-5415-2016-2-120-127

25. Владимирова Т.М., Третьяков С.И., Жабин В.И., Коттелов А.Е. Получение и переработка талловых продуктов. Архангельск : Изд-во Арханг. гос. техн. ун-та, 2008. 155 с.
26. Гурова Е.В., Галдина В.Д. Определение технических свойств нефтяных битумов. Омск : СибАДИ, 2014. 40 с.
27. Ковалев Я.Н., Галузо Г.С., Змачинский А.Э., Чистова Т.А. Строительные материалы. Лабораторный практикум. Минск : Новое знание, 2013. 633 с.

REFERENCES

1. Bystrov N.V. Standardization of Properties of Modified Bitumen. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroi-tel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2018; 20 (5): 198–203. (In Russian)
2. Gokhman L.M. Road Polymer Bitumen Concrete. Moscow: Ekon-Inform, 2017. 477 p. (In Russian)
3. Hunter R.N., Self A., Read J. The Shell Bitumen Handbook. 6th Ed., London: ICE Publishing. 2015. 485 p. DOI: 10.1680/tsbh.58378
4. Azari-Jafari H., Yahia A., Amor B. Life Cycle Assessment of Pavements: Reviewing Research Challenges and Opportunities. *Journal of Cleaner Production*. 2016; 1126: 2187–2197. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.080
5. Balaguera A., Carvajal G.I., Alberti J., Fullana-i-Palmer P. Life Cycle Assessment of Road Construction Alternative Materials: A Literature Review. *Resources, Conservation & Recycling*. 2018; 132 (24): 37–48. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.01.003
6. Simchuk E.N., Khapaev A.V., Rozhkov I.M. Modern Approaches to Modeling Bitumen Binder Aging in Laboratory Conditions. *Dorogi i mosty*. 2023; 48: 274–305. (In Russian)
7. EAPA, Asphalt in Figures 2020. Brussels, European Asphalt Pavement Association, 2021. 13 p.
8. Budris A. The EU restricts the supply of rubber and bitumen from Russia: what will be the consequences. Forbes. 01.03.2023. Available: www.forbes.ru/biznes/485436-es-ogranicivaet-postavki-kaucuka-i-bituma-iz-rossii-kakimi-budut-posledstvia (In Russian)
9. Ingrassia L.P., Lu X., Ferrotti G., Canestrari F. Renewable Materials in Bituminous Binders and Mixtures: Speculative Pretext or Reliable Opportunity? *Resources, Conservation and Recycling*. 2019; 144: 209–222.
10. Belova N.A., Strakhova N.A. Plasticization of Petroleum Bitumen with Spent and Mineral Synthetic. *Vestnik Astrahanskogo inzhenerno-stroitel'nogo instituta*. 2014; (1): 93–97. (In Russian)
11. Evdokimova N.G., Gryzina E.V., Alieva E.A., Gureev A.A. Preparation of Bitumen Production Raw Materials using Vacuum Residue of Visbreaking Unit. *Neftegazovoe delo*. 2011; (5): 323–335. (In Russian)
12. Mahssin Z.Y., et al. Converting Biomass into Bio-Asphalt – A Review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 19 (1). DOI: 10.1088/1755-1315/682/1/012066
13. Lahjiri F. Etude de l'impact physico-chimique des liants dits "régénérants" sur la constructibilité (performance et durabilité) des enrobés recyclés. *Physique. Français. Université Montpellier*. 2020; 307 p.
14. Elahi Z., et al. Waste Cooking Oil as a Sustainable Bio Modifier for Asphalt Modification: A Review. *Sustainability*. 2021; 13: 11506. DOI: 10.3390/su132011506
15. Doshlov O.I., Speshilov E.G. Polymer-Bitumen Binder – a High-Tech Base for Asphalt of New Generation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2013; (6): 140–142. (In Russian)
16. The Eurobitume life-cycle inventory for bitumen. Version 3.1 European Bitumen Association, Vol. 49. 2020.
17. Alvarez-Barajas R., et al. Bio and Waste-Based Binders with Hybrid Rubberized-Thermoplastic Characteristics for Roofing. *Polymer Testing*. 2024; 130: 108317. DOI: 10.1016/j.polymer-testing.2023.108317
18. Zhou Y. Hydrothermal Conversion of Biomass to Fuels, Chemicals and Materials: A Review Holistically Connecting Product Properties and Marketable Applications. *Science of The Total Environment*. 2023; 34. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163920
19. Samieadel A., Schimmel K., Fini E.H. Comparative Life Cycle Assessment (LCA) of Bio-Modified Binder and Conventional Asphalt Binder. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2018; 20(1): 191–200.

20. Aziz M.M.A., Rahman M.T., Hainin M.R., Bakar W.A. An Overview on Alternative Binders for Flexible Pavement. *Construction and Building Materials*. 2015; 84: 315–319.
21. Zhang Z., Fang Y., Yang J., Li X. A Comprehensive Review of Bio-Oil, Bio-Binder and Bio-Asphalt Materials: Their Source, Composition, Preparation and Performance. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2022; 9 (2): 151–166.
22. Smid V.A., Dilman A.D. Fundamentals of Modern Organic Synthesis. Moscow: BINOM, 2009. 750 p. (In Russian)
23. Methodological recommendations for the use of formulated binders in road coatings. Moscow: Soyuzdornii, 1980. 16 p. (In Russian)
24. Varankina G.S., Rusakov D.S., Kozik P.S. Investigation of veneer bonding processes with phenol-formaldehyde resin using intermediate products of sulfate-cellulose production. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2016; 2 (30): 120–127. DOI: 10.18324/2077-5415-2016-2-120-127 (In Russian)
25. Vladimirova T.M., Tretyakov S.I., Zhabin V.I., Koptelov A.E. Production and Processing of Tall Products. Arkhangelsk, 2008. 155 p. (In Russian)
26. Gurova E.V., Galdina V.D. Technical Properties of Petroleum Bitumen. Omsk, 2014. 40 p. (In Russian)
27. Kovalev Ya.N., Galuzo G.S., Zmachinsky A.E., Chistova T.A. Building Materials. Laboratory Practice. Minsk: Novoe znanie, 2013. 633 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Халикин Илья Алексеевич, студент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, gamepad777@mail.ru

Рожков Иван Михайлович, Научно-исследовательский институт транспортно-строительного комплекса, 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 73А, стр. 16, exstralab@mail.ru

Ван Линьфан, студент, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1, 162978339@qq.com

Ключников Илья Андреевич, начальник отдела технических исследований Управления научно-технических исследований, информационных технологий и хозяйственного обеспечения, Федеральное дорожное агентство, 129085, г. Москва ул. Бочкова, 4, kluchnikov35@gmail.ru

Лушников Николай Александрович, канд. техн. наук, доцент, Российский университет транспорта, 127055, г. Москва, ул. Образцова, 9; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, lab10@mail.ru

Небратенко Дмитрий Юрьевич, канд. хим. наук, доцент, Российский университет транспорта, 127055, г. Москва, ул. Образцова, 9; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, 125047, г. Москва, Миусская площадь, 9, стр. 1, nebratenko@mail.ru

Authors Details

Ilya A. Khalikin, Student, The National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavl Road, 129337, Moscow, Russia, gamepad777@mail.ru

Ivan M. Rozhkov, Research Institute of Transport and Construction Complex, 73A, Aviamotornaya Str., Build. 16, 111024, Moscow, Russia, exstralab@mail.ru

Linfan Wang, Student, Bauman Moscow State Technical University, 5, 2nd Bauman Str., 105005, Moscow, 162978339@qq.com

Ilya A. Kluchnikov, Head of the Technical Research Department, The Federal Road Agency (Rosavtodor), 4, Bochkova Str., 129085, Moscow, Russia, kluchnikov35@gmail.ru

Nikolay A. Lushnikov, PhD, A/Professor, Russian University of Transport, 9, Obraztsov Str., 127055, Moscow, Russia; The National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Road, 129337, Moscow, Russia, lab10@mail.ru

Dmitry Yu. Nebratenko, PhD, A/Professor, Russian University of Transport, 9, Obraztsov Str., 127055, Moscow, Russia; The National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Road, 129337, Moscow, Russia; D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 9, Miusskaya Sq., 125047, Moscow, Russia, nebratenko@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 14.02.2025
Одобрена после рецензирования 03.03.2025
Принята к публикации 05.03.2025

Submitted for publication 14.02.2025
Approved after review 03.03.2025
Accepted for publication 05.03.2025